

J E R E M Y C A M P B E L L

HOMO

GRAMMATICUS

DE INFORMATIETHEORIE

ALS DE GRAMMATICA

VAN DE NATUUR



Homo Grammaticus

Homo grammaticus

Die grammatische Struktur des
deutschen Satzes

ACON

Jeremy Campbell

Homo grammaticus

De informatietheorie als de
grammatica van de natuur

AGON



Oorspronkelijke titel: Grammatical man
Oorspronkelijke uitgever: Simon & Schuster, New York, 1982
Vertaling: Willem Dijkhuis
Omslagontwerp: Rob Buschman
Redactie: Rob Hordijk, Jeanne Polderman
Eindredactie en vormgeving: Tom Kooij
Software: Quark XPress™ B-versie, Quark International, MacVonk

CIP-gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag
Campbell, Jeremy

Homo Grammaticus: de informatietheorie als de grammatica van de natuur / Jeremy Campbell; [vert. uit het Engels door Willem Dijkhuis]. - Amsterdam: Agon - Vert. van Grammatical man: information, entropy, language and life. - New York: Simon & Schuster, 1982. - Met lit.opg., reg.

ISBN 90-5157-005-8

SISO 004 udc 001.9+621.391 NUGI 850

Trefw.: informatietheorie.

© 1982 Jeremy Campbell

© 1988 voor de Nederlandse taal:

Uitgeversmaatschappij Agon B.V., Amsterdam

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op enige andere wijze zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever

No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise without prior permission of the Copyright owner.

Voor mijn vrouw Pandora,
een onovertroffen informatiebron


Dankbetuiging voor verleende toestemming tot weergave van fragmenten van de volgende werken:

Uit *Have His Carcase*, Dorothy Sayers. Copyright Dorothy Leigh Sayers Fleming, met toestemming van Harper and Row Publishers, Inc.

Uit *The Decline of the West*, Oswald Spengler. Geannoteerde uitgave, Helmut Werner, Engelse editie verzorgd door Arthur Helps naar de vertaling van Charles Francis Atkinson. © 1962 Alfred A. Knopf, Inc. Met toestemming van de uitgever.

Uit *Finnegans Wake*, James Joyce. Copyright 1939 James Joyce. Copyright vernieuwd in 1967, George Joyce en Lucia Joyce. Toestemming van Viking Penguin, Inc.

Uit *Poems of Dylan Thomas*. Copyright 1945, Trustees for copyrights of Dylan Thomas. Toestemming van New Directions Publishing Corp., New York.



Digitized by the Internet Archive
in 2024

INHOUD

Woord vooraf	9
--------------	---

I. ONTSTAAN VAN EEN INFORMATIETHEORIE

1. De tweede wet en het Gele Gevaar	15
2. De ruis van warmte	29
3. De demon ontroond	39
4. Een broeinest van subtiliteiten en vallen	47
5. Niet te saai, niet te spannend	59
6. Worstelen met willekeur	65

II. DE NATUUR ALS INFORMATIEPROCES

7. Pijlen in alle richtingen	73
8. Chemische woorden en chemische daden	79
9. Over de complexiteitshindernis	87
10. Iets redelijk subtiels	97

III. HET CODEREN VAN TAAL EN HET CODEREN VAN LEVEN

11. Algoritmen en evolutie	109
12. Tot de dood gedeeltelijk groen	117
13. Astronauten uit de oudheid overbodig	125
14. Taalboodschappen: helderheid en ruis	135
15. Een spiegel van de geest	145

IV. HOE DE HERSENEN ALLES SAMENVATTEN

16. De hersenen als kat op een heet zinken dak en andere vermeende waarheden	161
17. De beleidslijnen van het zien	171
18. Bodem en piek van het geheugen	183
19. Informatie via dromen	197
20. Het links en rechts van het weten	203
21. De tweede-theoremamaatschappij	217

Nawoord: Aristoteles en het DNA	227
Noten	235
Register	255

Woord vooraf

Dit boek probeert het verhaal van de informatietheorie te vertellen en hoe deze tevoorschijn kwam uit de gisting van wetenschappelijke activiteiten die de Tweede Wereldoorlog met zich bracht. Het resultaat van dit oorlogsonderzoek was niet slechts een simpele herdefiniëring van een term die lange tijd hinderlijk vaag was gebleven. Integendeel, er ontstoot een nieuwe tak van wetenschap die het mogelijk maakte om onhandelbare vraagstukken vanuit een hogere waarnemingspost in het domein van de kennis te beschouwen. De wetten en theorema's van deze wetenschap stimuleerde de opkomst van opwindende nieuwe ideeën op andere gebieden, zoals biologie, taalwetenschappen, waarschijnlijkheidsleer, filosofie, kunst, computerkunde en sociologie. Op dezelfde wijze als waarmee de nieuwe kennis over energie een grote oogst aan nieuwe ideeën opleverde in takken van wetenschap die ver buiten haar oorspronkelijke horizon lagen, zo opende de informatietheorie vensters die uitkijken over kennisdomeinen die zo breed zijn als de natuur zelf en zo complex als de menselijke geest.

Zowel biologen als filosofen opperden dat het universum, met alle levende wezens daarin, het gevolg zijn van kansen, maar niet van gelukkige samenlopen van omstandigheden. Anders gesteld, de krachten van toeval en anti-toeval coëxisteren in een complementaire relatie. Het willekeurige element wordt entropie genoemd, de veroorzaker van chaos, het element dat de neiging vertoont het onderscheidene te vermengen, betekenis te vernietigen. Het niet-willekeurige element is informatie, dat element benut de onzekerheden, die het gevolg zijn van het entropieprincipe, om nieuwe structuren te genereren en de wereld op ongekende wijzen van informatie te voorzien.

De informatietheorie laat zien dat het logisch is dat de krachten van anti-toeval even universeel zijn als de krachten van het toeval, hoewel entropie als een oneindig veel krachtiger principe is voorgesteld. De passende metafoor voor het levensproces wordt niet langer gezien als rollende dobbelstenen of een draaiende roulette, maar meer als zinnen uit een taal, deels voorspelbaar, deels onvoorspelbaar. Deze zinnen worden gegenereerd vanuit regels die veel scheppen uit weinig en een ongebreidelde welige rijkdom aan betekenis opleveren met een eindige hoeveelheid woorden. Zij maken het taal mogelijk om tegelijkertijd zeer bekend en toch verrassend te zijn, sterk ingeperkt en toch onvoorspelbaar binnen haar grenzen.

Betekenis en orde, zegt de theorie, kan nonsens en chaos te boven komen. De wereld hoeft niet noodzakelijkerwijs af te glijden naar het eenvoudige, het banale en het eenvormige, maar kan voorwaarts gaan, op weg naar rijkere en complexere fysieke en mentale structuren. Het leven blijft, net als taal, 'grammaticaal'. Het klassieke begrip van entropie impliceerde dat structuur uitzondering is en verwarring regel. De informatietheorie maakt daarentegen dat orde volkomen natuurlijk is: *Homo grammaticus* bewoont een grammaticaal universum

DEEL I

Ontstaan van een informatietheorie

1. DE TWEEDE WET EN HET GELE GEVAAR

Wat hebben de codes waarmee vanuit een ruimtevoertuig boodschappen worden verstuurd gemeen met genen op een DNA-molecule? Hoe komt het dat de tweede wet van de thermodynamica, de ontdekking van een natuurkundige, verband houdt met communicatie, zodat we kunnen spreken van de 'entropie' van een stuk bladmuziek, van een pagina tekst of van een gesprek? Hoe komt het dat de lastigste problemen in de wiskundige waarschijnlijkheidsleer te maken hebben met de wijze waarop wij ons in woord en geschrift uitdrukken? Het antwoord op al deze vragen is 'informatie'. Het simpele feit dat één enkel begrip zoveel uiteenlopende ideeën met elkaar kan verbinden, maakt duidelijk hoe algemeen en ingrijpend dat begrip is.

Informatie is een woord dat nooit erg helder te definiëren is geweest. In de meest gebruikte zin wordt informatie thans verstaan als nieuws, inlichtingen, feiten en ideeën die zijn verworven en worden doorgegeven als kennis. Maar in de middeleeuwen had de term in de volkstaal en de literatuur een groter aantal betekenissen. Naast de betekenissen die we ook nu nog kennen, had het woord bovendien een actievare, opbouwende waarde, te vergelijken met datgene wat een bepaalde vorm of aard aan een ding of een idee gaf; een kracht die leidt, koppelt, onderwijst, inspireert of tot leidraad dient.

Pas in de jaren veertig van deze eeuw werd informatie als wetenschappelijke term gedefinieerd en deze definitie was wezenlijk nieuw en afwijkend van wat de woordenboeken vermeldde. Toch werd het begrip informatie, na exact genoeg te zijn beschreven om mathematici en telecommunicatie-ingenieurs tevreden te stellen, op wonderlijke wijze populair bij niet-wetenschappers. Het woord herwon een aantal van zijn betekenissen die in onbruik waren geraakt. Een visie bloeide op waarin informatie wordt gezien als een actief agens, iets dat niet alleen passief blijft, maar de materiële wereld 'informeert', op dezelfde wijze waarop de hele celmachinerie wordt aangezet tot de ontwikkeling tot een compleet organisme door de boodschappen in genen of de manier waarop radiosignalen een ruimtevaartuig via een complexe route door het heelal loodsen.

Zo kwam informatie te voorschijn als een principe dat in de wereld actief is, het vormeloze vormgevend, het bijzondere karakter van levensvormen beschrijvend en dat zelfs, via speciale regels, behulpzaam is bij het nauwkeurig bepalen van menselijke gedachtenpatronen. Op deze wijze overspant informatie de niet vergelijkbare terreinen van computers uit het ruimtevaarttijdperk en klassieke natuurkunde, moleculaire biologie en menselijke communicatie, het ontstaan van taal en de evolutie van de mens.

Het moge duidelijk zijn dat de natuur niet meer kan worden beschouwd als louter materie en energie. Noch kunnen al haar geheimen worden ontsluitend door middel van scheikunde en natuurkunde, hoe succesvol deze takken van

wetenschap zich deze eeuw ook hebben getoond. Een verklaring van de wereld die pretendeert compleet te zijn heeft een derde component nodig. De krachtige theorieën uit de natuur- en scheikunde moeten worden aangevuld met een recente nieuwkomer: een informatietheorie. De natuur moet worden verklaard in termen van natuurkunde, scheikunde en informatie.

Informatie als wetenschappelijk concept ontstond bij de dageraad van de elektronische communicatie, in de eerste helft van deze eeuw. Wetenschappers deden ermee wat hun negentiende-eeuwse voorgangers hadden gedaan met het energieconcept: ze modelleerden het tot een theorie, voorzagen deze van wetten, omkransten de theorie met vergelijkingen en wrongen er, naar goede gewoonte, zoveel mogelijk vaagheid en mysterie uit.

In zijn pure vorm was de informatietheorie een civieltechnische ontdekking. De meest opmerkelijke praktisch succesvolle toepassingen lagen op het terrein van de transmissie van kleurentelevisiesignalen, van het ontwerpen van vroeg waarschuwende radar en het oppikken van intacte boodschappen van ver verwijderde ruimteschepen. De theorie werd in 1948 wereldkundig gemaakt in twee artikelen van de hand van Claude Shannon van Bell Telephone Laboratories in het juli- en oktobernummer van *Bell Technical Journal*. In wezen bevatten de artikelen een stelsel van theorema's over het efficiënt, snel en goedkoop verzenden van boodschappen van de ene plaats naar de andere. Maar verder reikende en meer opwindende implicaties van Shannons werk liggen in het feit dat hij het informatieconcept zó logisch en zó precies had kunnen beschrijven, dat het in een formeel netwerk van ideeën kon worden geplaatst.

Door informatie te behandelen in helder gedefinieerde maar geheel abstracte termen, kon Shannon, algemene regels stellen die niet voor één soort of voor enkele soorten informatie gelden, maar voor alle soorten, overal. Hoewel zijn artikelen op het eerste oog cryptisch en technisch aandoen, bieden zij een nieuwe manier van kijken naar de wereldprocessen die, gezien door de bril van de klassieke ideeën, onbegrijpelijk lijken. Hun gehele betekenis is nog niet ten volle benut. Ondanks het feit dat de informatietheorema's vooral bedoeld waren voor radio- en telefoontechnici, kunnen ze worden gebruikt bij het onderzoeken van *elk willekeurig* systeem waarin een boodschap van de ene plaats wordt overgebracht naar de andere.

Net zoals Newtons wetten van beweging niet specifiek gelden voor de beweging van bepaalde lichamen, gelden Shannons wetten over informatie ook universeel en dwingen ze zo wetenschappers en andere denkers om onder ogen te zien dat informatie zelf universeel is. De theorema's werden zo ruim geïnterpreteerd dat Shannon zich onbehaaglijk voelde over het waas van schittering en glamour die rond het onderwerp was ontstaan en de golf van publiciteit dat in het kielzog daarvan werd meegevoerd, zodat hij in 1956 in een artikel waarschuwde dat de informatietheorie "wellicht was opgeblazen tot een

belangrijkheid die groter is dan de praktische behaalde resultaten rechtvaardigen... Zelden worden meer dan enkele geheimen uit de natuur tegelijkertijd onthuld.' Toch was het vanaf het begin duidelijk dat de theorie een licht wierp op zeer diepe, fundamentele vragen die het blikveld van radiotechniek ruimschoots overschreden. De theorie drong door in vele intellectuele domeinen, had invloed op paradoxen die eeuwenlang onopgelost waren gebleven, door een nieuw perspectief te bieden op vraagstukken waarmee de filosofie door de hele geschiedenis had geworsteld.

Shannons artikelen behandelen zaken van algemeen intellectueel belang: orde en wanorde, fout en foutbeheersing, kansen en de realisatie van kansen, onzekerheid en de grenzen van het onzekere. Wetenschappers onderzoeken nog steeds het raadsel dat voortbrengselen van de natuur zo onwaarschijnlijk zijn en zoveel ordening vertonen, terwijl toch hun meest waarschijnlijke toestand is: verwarring en afwijking, een overgave aan de machten van wanorde in het heelal die zo overweldigend en natuurlijk lijken. Dit geldt nog steeds als een van de verontrustende paradoxen in de wetenschap. Het is het broertje van de eeuwige vraag in de filosofie: 'Waarom bestaat er iets in plaats van niets?' Shannon bewees in zijn artikelen van 1948 dat 'iets', een boodschap, in tegenstelling tot wat men zou verwachten, stand kan houden te midden van 'niets', een willekeurige wanorde, of ruis.

Het meest opvallende van alles was dat Shannons uitdrukking voor de hoeveelheid informatie, de eerste nauwkeurige wetenschappelijke maat en de eerste behoorlijke definitie van dit typisch twintigste-eeuwse produkt, dezelfde vorm had als de vergelijking die vele jaren eerder, in de negentiende eeuw, was opgesteld voor de merkwaardigste en ongrijpbaarste van alle natuurkundige wetten, het entropie-principe. Shannon was begonnen aan de oplossing van een concreet probleem binnen de communicatie via radio en telefoon en wat hij door strikt deductieve methoden bereikte, was in wezen identiek aan de entropieformule die was ontstaan uit de Victoriaanse natuurkunde. Die vergelijking was een wiskundige uitdrukking voor de neiging van alle dingen om minder geordend te worden wanneer ze aan zichzelf worden overgelaten; dat betekent voor energie het ondergaan van bepaalde transformaties tijdens het natuurlijke verloop van gebeurtenissen, waardoor ze wanordelijker wordt en minder bruikbaar: een verlaging van haar kwaliteit zonder afname van haar kwaliteit. Entropie was een denkbeeld waarvan een enorme aantrekkingskracht uitging op niet-wetenschappers in de negentiende eeuw en later, omdat het suggereert dat chaos een eindstation is van alles. Het leidde tot bergen dubieus giswerk en inspireerde zowel idioten als integere denkers. Het werd een referentiepunt, een metafoor, waar filosofen, theologen en historici van die periode steeds met meer bevologenheid dan voorzichtigheid naar terugkeerden. Deze natuurkundige 'wet', die verkondigde dat het universum ontaardt in een staat van volledige wanorde, had een waarneembare invloed op intellectuele modes. En ditzelfde begrip maakte nu in het werk van Shannon zijn entree in een andere vermomming, een andere context.

De entropievergelijking van Shannon wees op zijn minst op een sterke analogie tussen energie en informatie. Entropie was de verbindende schakel. Ze verenigde twee denkbeelden, twee tijdperken. Energie was het centrale thema van de Victoriaanse wetenschappen toen machines de natuurkrachten steeds meer aanwendden voor het verrichten van mensenwerk. Het begrip is ook aanwezig in de kunst en de literatuur van die tijd, in het bijzonder in de gedichten van William Blake. De stroming van de Romantiek stelde veel belang in energie en haar verschillende transformaties. Een restant daarvan kan men zelfs later nog aantreffen in het werk van Freud, die instincten en behoeften zag als energievlagen die door het brein walsten. De stoommachine was het embleem van de industriële revolutie, zoals de computer het embleem is van de informatierevolutie. Hoe verschillend die twee ook mogen lijken, ze zijn toch aan elkaar gekoppeld door de theorie van Shannon.

De artikelen van Shannon werden gepubliceerd slechts vijf jaar voordat James Watson en Francis Crick in het Cavendish-laboratorium in Cambridge de geheimen van DNA ontsluitten. De dubbele spiraal van het DNA bleek een informatiesysteem te zijn, maar de verder reikende gevolgen van deze ontdekking werden jarenlang niet onderzocht. Zelfs in zijn waarschuwingen aan de onderzoekers in andere disciplines voor een kritiekloze toepassing van de informatietheorie, gaf Shannon zelf toe dat ze zeer relevant zouden kunnen zijn voor het functioneren van de genen en het zenuwstelsel en liet hij de mogelijkheid open dat 'de mens werkt als een ideale decoderingsmachine'. De informatietheorie doorliep de hele scala van euforie tot teleurstelling in de tien jaar na haar eerste verschijning. Spoedig na de publikatie van de theorema's van Shannon bazuinde het tijdschrift *Fortune* al rond:

Grote wetenschappelijke theorieën behoren, zoals grote symfonieën en grote romans, tot de meest trotse en meest schaarse scheppingen van de mens. Wat de wetenschappelijke theorie een aparte plaats geeft en in zekere zin boven andere scheppingen verheft, is haar vermogen grondig en snel het beeld te veranderen dat de mens van zijn wereld heeft... Nog geen vijf jaar geleden verscheen een theorie die een aantal van deze kenmerken van grootsheid lijkt te hebben.

Later werd de informatietheorie teleurstellend bevonden - en daarmee sloeg ze door naar de andere kant. Men zei dat ze niet tot een grote verheldering had geleid. Maar in de jaren zeventig begon ze te rijpen en zich te verdiepen. Ze kreeg iets van haar vroegere glans terug. In die tijd vond het diepgaande onderzoek van de structuur van genetische informatie plaats en dat leidde tot belangrijke nieuwe perspectieven in de niet afgeronde evolutietheorie.

Shannon is een rustige en bescheiden persoonlijkheid die zijn ideeën niet gauw onder het oog van het publiek brengt: het applaus en erkenning lijken hem koud te laten. Hij publiceert notoir weinig. Tot op de dag van vandaag is een deel van zijn werk nog steeds niet uitgegeven, hoe collega's hem ook heb-

ben gesmeekt het voor publikatie klaar te maken. Robert Fano, hoogleraar in de elektrotechniek aan het Massachusetts Institute of Technology (MIT), zei over Shannon het volgende:

Een belangrijke hoeveelheid werk dat hij in de jaren vijftig heeft gedaan, is nooit gedrukt. Hij wil niet dat iemand anders zijn artikelen voor hem schrijft en zelf schrijft hij ze ook niet. Van onderwijs geven houdt hij niet. Brieven beantwoordt hij niet. Zijn lezingen zijn schitterend, het zijn allemaal juwelen. Ze klinken spontaan, maar in werkelijkheid zijn ze zeer, zeer zorgvuldig voorbereid.

Shannon werd in 1916 geboren in Petoskey, Michigan. Hij deed zijn kandidaats aan de universiteit van Michigan en zijn doctoraal aan het MIT. Hij vertelde mij dat het besef van een informatiemaat van entropie-achtige gedaante tussen 1940 en 1941 begon te dagen, toen hij onderzoek deed in Princeton en studeerde onder leiding van Hermann Weyl, een van de grote wiskundigen en wiskundig-filosofen van zijn tijd. Slechts weinig wetenschappers rond Shannon hadden weet van de ideeën die hij in stilte ontwikkelde. J. R. Pierce, een elektrotechnisch ingenieur, was net na de Tweede Wereldoorlog, toen zij beiden bij de Bell Telephone Laboratories werkten, bevriend met Shannon. Hij herinnert zich nog dat hij aan Shannon vroeg of hij soms nieuwe theorema's had bewezen en of hij die dan in een notitieboek opschreef. Pierce is er zeker van dat het notitieboek, dat nu weg is, maar weinig theorema's bevatte. Daardoor sloeg Shannons theorie, toen die eenmaal was verschenen, volgens Pierce in 'als een bom en dan ook nog als een bom met een vertraagde ontsteking'.

Een andere collega, Edward Moore, nu verbonden aan de universiteit van Wisconsin, beschreef Shannon als een perfectionist die heel snel werkte, maar het niet over zijn hart kon verkrijgen een artikel voor publikatie uit handen te geven als hij dat niet tot in de puntjes had verbeterd en gepolijst. 'Hij kan het artikel vijf jaar laten liggen met de gedachte dat het verbeterd moest worden en zich afvragend of hij de juiste variabele in een of andere vergelijking had gekozen,' vertelde Moore. 'En dan, terwijl hij nog steeds verbeteringen aan het overwegen was, kwam een ander met een gelijksoortig resultaat dat misschien wel correct was, maar zo in formele elegantie te kort schoot dat Shannon zich zou hebben geschaamd zo'n slordig stuk werk af te leveren.'

Met het verstrijken van de tijd werkte Shannon zich onmerkbaar uit de academische wereld. De routine zinde hem niet. 'Omstreeks 1960-1961 verdween hij langzaam en zag je hem steeds minder in zijn kantoor,' herinnert Fano zich, de man die ervoor had gezorgd dat Shannon in 1956 als 'Donner Professor of Science' naar het MIT kwam.

Tegen 1963 was hij daar nauwelijks meer. Aan het eind van de jaren vijftig begon hij op de effectenbeurs te speculeren. Zijn interesse werd gewekt toen hij werkte aan een belangrijk wetenschappelijk probleem: de partitie van een onafhankelijke tijdreeks. Het beursgemiddelde is een goed voorbeeld van zo'n reeks, omdat de fluc-

tuaties daarvan in het verloop van de tijd worden beïnvloed door allerlei verschillende factoren. Shannon probeerde technieken te ontwikkelen om de verschillende invloeden van elkaar te scheiden en hij nam de effectenbeurs als voorbeeld. Ik geloof niet dat hij iets klaarspeelde met het wiskundige probleem, maar het speculeren kreeg hij aardig onder de knie.

Een tweede figuur, eveneens op het MIT, die belangrijke bijdragen leverde aan de oorsprong van de informatietheorie, leek zo weinig op Shannon als men zich maar kan voorstellen. Dit was Norbert Wiener, een flamboyant en exentriek persoon die graag de loftrumpet over zijn eigen aanzienlijke verdiensten stak. Shannon had als student in de vroege jaren dertig ook enkele colleges van Wiener bijgewoond.

In 1947, een jaar voor de publikatie van Shannons theorie, werkte Fano aan zijn proefschrift op het MIT. Af en toe stapte Wiener de kamer van Fano binnen, paffend aan zijn sigaar, en zei dan: 'Informatie is entropie.' Vervolgens draaide hij zich om en liep zonder een woord te zeggen weg. Wiener had dus kennelijk iets begrepen van het verband tussen informatie en entropie. Velen hadden hetzelfde, algemene idee; het hing kennelijk in de lucht. Ten minste een half dozijn onderzoekscentra in de Verenigde Staten en Engeland had sinds het begin van de jaren veertig gewerkt aan de wiskunde van communicatie en het scheiden van boodschappen en ruis. Maar de meeste inspanningen om die vraagstukken op te lossen waren bepaald ad hoc, met weinig idee hoe de verschillende onderdelen van het onderwerp tot een samenhangend geheel in elkaar pasten. Julian Bigelow, een collega van Wiener op het MIT, omschrijft deze vroege onderzoeken als 'wiskundig timmerwerk', terwijl Shannon een unicum en een katalysator was met zijn inzicht dat wat tot nu toe was behandeld als een verzameling van afzonderlijke onderwerpen, in werkelijkheid 'verschillende aspecten van een nieuwe en ontluikende wetenschap' behelsde.

Wiener schreef een recensie over Shannons artikelen waaruit een opmerkelijk onbegrip naar voren kwam van wat Shannon had gepresteerd. Zijn onmiskenbaar gebrek aan inzicht kan verband houden met Wieners uitzonderlijke en hoogst egocentrische persoonlijkheid. Zijn dochter, Barbara Raisbeck, weet nog hoe Wiener in het algemeen het werk van concurrerende wiskundigen vermeed te lezen. 'Hij was een erg ijdele en gecompliceerde man die het best in zijn eentje werkte,' aldus Barbara Raisbeck. 'Hij dacht dat als hij zijn concurrenten niet zag, ze vanzelf zouden verdwijnen. Hij was ook bang de ideeën van een ander onbewust te gebruiken.' Gordon Raisbeck, Wieners schoonzoon, denkt dat Wiener de resultaten van Shannon wel degelijk las en begreep, maar dat hij deed alsof dit niet het geval was. 'Ze begrijpen zou hebben betekend dat hij toegaf ze niet zelf allang te hebben gevonden,' aldus Raisbeck. 'Norbert Wiener wilde zoiets niet. Ik heb hem meer dan eens lezingen horen geven over de informatietheorie zonder Shannon ook maar te vermelden, wat een prestatie op zich was.' Gedurende de oorlogsjaren had Wiener Shannon

veel geholpen toen zij op het MIT gezamenlijk werkten aan militaire projecten en Shannons bijzonder geïnteresseerd raakte in pro-thermodynamica. Maar Julian Bigelow, die destijds veel met Wiener omging, vertelde me: 'Ik ben er heel zeker van dat Wiener zich niet volledig bewust was van de behoefte aan een alomvattende communicatietheorie en evenmin van het feit dat die hoe dan ook op het punt stond geboren te worden.'

Wiener is het meest bekend als de vader van de cybernetica, een buitengewoon omvangrijke discipline die ook de informatietheorie omvat als een van de aanvullende gedachtenstelsels. De cybernetica is de wetenschap van het handhaven van orde in een systeem - of dat systeem nu natuurlijk of kunstmatig is. Aangezien alle dingen op de wereld de neiging hebben entropisch, wanordelijk, te worden moet het doeleloos afwijken voortdurend worden gecorrigeerd. Dit wordt bereikt door informatie over het gedrag van het systeem te gebruiken om een ander, regelmatig gedrag te verkrijgen. Met zulke middelen wordt het systeem op koers gehouden. De term 'cybernetica' is afgeleid van een Grieks woord dat 'roerganger' betekent, wat een zin voor stabiliteit weergeeft, van constant en correct functioneren. Ziekte is entropisch, onregelmatig, een fout in het levende systeem; genezing echter is cybernetisch: zij herstelt het lichaam in zijn oorspronkelijke staat door de fout te corrigeren. Natuurlijke selectie is ook cybernetisch door het tenietdoen van genetische mutaties die op ongewenste manieren van de norm doen afwijken. Wiener vatte de menselijke maatschappij op als een zelfregulerend systeem dat geordend blijft door het cybernetische mechanisme van zijn wetten. Cybernetica dwingt consistentie af. Ze staat verandering toe, maar de verandering moet ordelijk zijn en volgens het boekje. Ze is een algemeen geldend principe van beheersing en kan op alle soorten ordening worden toegepast, net zoals Shannons theorema's op alle soorten communicatie van toepassing zijn. Het doet er niet toe of het een elektrisch, chemisch, mechanisch, biologisch of economisch systeem is.

Wieners temperament verschilde sterk van dat van de scrupuleuze en de zichzelf wegcijferende Shannon. Hij was een ambitieuze, zichzelf speels aanprijzende wiskundige van wereldformaat in een tijd dat Amerika zulke grootheden van eigen bodem opvallend miste. Hij was een voormalig wonderkind op wiens persoonlijkheid het vroegrijpe een duidelijk stempel had gedrukt. Hij leefde in een staat van notoire onzekerheid over de dagelijkse conditie van de eigen genialiteit en hij had doorlopend een schouderklopje van zijn collega's nodig. Lichamelijk was hij zo onhandig dat zelfs de handeling van het schrijven een kwelling betekende; hij was neurotisch, trots, een slechte luisteraar, hij sprak een aantal talen, maar was in bijna alle moeilijk te volgen en bovendien was hij, zoals hijzelf toegaf, een hopeloos administrator. Niettemin was Wiener een zeer vooraanstaand wiskundige, een van de beste die de Verenigde Staten had opgeleverd. Zijn roem straalde af op de wiskundefaculteit van het MIT die toen hij daar begon bekend stond als middelmatig.

Als kind kreeg Wiener les van zijn vader, Leo Wiener, een slavist die tot bovenmenselijke intellectuele hoogstandjes in staat was en hetzelfde van zijn

zoon verwachtte. Na uren van studie werd de jonge Wiener aan het werk gezet in de groententuin, terwijl zijn vader heen en weer liep, voorlas uit het werk van Tolstoj en die passages koos waarin de adellende gevolgen van noeste lichamelijke arbeid werden aanbevolen.

Wiener dook op vierjarige leeftijd in de wetenschappelijke literatuur, had zijn propaedeuse op zijn tiende, kreeg zijn graad toen hij vijftien was, ging daarna filosofie studeren aan Cornell University en voltooide op zijn achttiende een proefschrift over de relatie tussen wiskunde en filosofie. Vervolgens nam hij een bezoekersassistentenschap in Cambridge waar hij studeerde bij Bertrand Russell en de getal-theoreticus G.H. Hardy.

In sommige opzichten werd Wiener in Cambridge door Hardy beïnvloed, in andere weer niet. De vraagstukken waarop hun wegen uiteen gingen, zijn misschien interessanter dan die waarover ze het eens waren. Hardy geloofde hartstochtelijk in de zuiverheid van de wiskunde. Hij onderschreef de opvatting dat het waarschijnlijker is dat een wiskundige vergelijking waar is als ze ook mooi is en bijna zeker niet waar als ze lelijk is. Het idee de wiskunde te gebruiken voor wereldlijke doelen vond Hardy afstotend. In sommige gevallen geloofde hij zelfs niet dat zulke doelen eigenlijk konden bestaan. Hij vroeg zich af of Wieners stelling dat fysische problemen hem hadden geïnspireerd tot een deel van zijn beste wiskundige werk, niet een 'pose' was. Wiener dacht dat Hardy's weigering deel te nemen aan de Eerste Wereldoorlog slechts ten dele voortkwam uit gevoelens van afkeer van de misère die hij veroorzaakte. Een ander motief, misschien niet te scheiden van het eerste, was Hardy's afschuw van het feit dat de oorlog de schoonheid van de wiskunde voor militaire doeleinden perverteerde.

Dit professorale geloof in het bestaan van wiskunde omwille van de wiskunde deelde Wiener niet. Hij betreurde de moderne tendens kennis op te splitsen in afzonderlijke territoria, elk met een eigen jargon, en tot verboden gebied te verklaren voor wetenschappers uit andere gebieden. Hij beschouwde Leibnitz (1646-1716) als de laatste persoon met een volledige greep op alle belangrijke denkbeelden van zijn tijd. Wiener zelf voelde heel sterk dat het abstracte vermogen van wiskunde - en hij was het beste voorbeeld van de pure wiskundige in alle technische aangelegenheden - ook de gewone, levende wereld zou moeten beroeren. In Cambridge had Russell hem ervan doordrongen dat de wiskundige een helder fysisch inzicht moet hebben. En in Göttingen was Wieners bewondering voor David Hilbert, een reus van de Duitse wiskunde in de eerste decennia van de twintigste eeuw, voor een deel toe te schrijven aan Hilberts praktische instelling.

Wiener had een zeer brede intellectuele belangstelling. Hij had als free-lancer artikelen geschreven voor de *Encyclopedia Americana* en was verslaggever geweest voor de oude *Boston Herald*, waar hij het slechts een paar maanden uithield. Hij had ook een roman geschreven, *The Tempter*. Als jongeman ging

zijn belangstelling uit naar de biologie; in de wiskunde was hij in feite een laatbloeiër. Hij was een zeer onafhankelijk en kieskeurig denker die religieuze orthodoxie en politiek totalitarisme gelijkelijk verafschuwde. Toen in Europa de Tweede Wereldoorlog uitbrak, werd hij vrijgesteld van militaire dienst - hij was bijziend en fysiek hoe dan ook toch al niet geschikt - maar hij probeerde wel met onderzoekswerk een aandeel te leveren aan de oorlogsinspanningen. Hij kreeg een kleine beurs om te werken aan een aspect van vuurgeleidings-systemen voor luchtdoelgeschut, destijds een militair onderzoeksproject dat van het grootste belang was.

De bestaande wapens konden toen nauwelijks iets uitrichten tegen Duitse bommenwerpers, die hoger en sneller vlogen dan die in de Eerste Wereldoorlog. In oktober 1940, drie maanden na het begin van de bombardementen op Engeland, waren er met het gebruikte drie-inch luchtdoelgeschut voor elk vijandelijk vliegtuig dat boven Londen was neergeschoten, naar schatting meer dan 10 000 schoten afgevuurd. In die oktobermaand, toen de Britten bijna willekeurig hun geschut op de aanvallers afvuurden, kwamen de Bell-laboratoria met een idee dat bij een van hun ingenieurs in een droom was opgekomen: een elektrisch vizier waarmee de plaats van het vliegtuig enkele seconden na het afvuren van het schot berekend en voorspeld kon worden. Een intensieve onderzoeksinspanning kwam op gang, door de inzet van wetenschappers van de Bell-laboratoria en het MIT, waar Wiener toen werkte, om geautomatiseerde apparaten te ontwerpen die een vliegtuig konden volgen, zijn positie, richting en snelheid berekenen en voorspellen waar het zich zou bevinden tegen de tijd dat de luchtafweergranaat van het kanon het doelgebied had bereikt.

Het probleem hoe een ver verwijderd, grillig bewegend toestel kan worden geraakt, kwam elke gokker vertrouwd voor: hoe kunnen de juiste keuzen worden gemaakt onder omstandigheden die zeer zorgvuldig zodanig in elkaar zijn gezet dat ze onvoorspelbaar zijn. In hun pogingen Duitse bommenwerpers neer te halen hadden de Britse geschutsteams van ten minste twee soorten onzekerheid last. Voor een voltreffer konden ze niet simpeltjes hun kanonnen rechtstreeks op het vijandelijke toestel richten. Aangezien het doelwit zich ongeveer even snel langs de hemel bewoog als de granaat zich van het afweergeschut kon verwijderen, moest de bemanning zeker zo'n dertig toestellengten vooruit mikken. Om het projectiel met behulp van dit nieuwe apparaat zijn doelwit te doen bereiken moest het radarsignaal zo nauwkeurig mogelijk zijn en de vlucht van de bommenwerper zo voorspelbaar mogelijk. Maar op het radarscherm worden de signalen die het traject van een toestel volgen, vervormd door ongeordende elektrische interferenties in de atmosfeer en daarbij doet de piloot uiteraard zijn best de schutters in de war te brengen door zo eigenzinnig en zo onvoorspelbaar mogelijk te vliegen.

In deze oorlogstijd gooide Norbert Wiener al zijn intense, neurotische energie op zijn werk en verdichtte hij het web van een carrière lange interesse in de onderling verbonden begrippen van waarschijnlijkheid, onzekerheid en van wat hij noemde 'de hoogste bestemming der wiskunde: het ontdekken van

orde te midden van wanorde.' De functionele onvolmaaktheden van radar, vroeg in de oorlog, zadelden wetenschapsmensen op met de taak de geordende boodschap te scheiden van de wanorde van de ongewenste elektrische interferentie, of 'ruis'. In het spraakgebruik van de communicatie is ruis alles wat de gaafheid van de boodschap bederft: statische elektriciteit in een radiotoestel, vermindering van een gedrukte tekst, vertekening van het beeld op een televisiescherm. Wanneer een radiosignaal van een vijandelijk vliegtuig in de lucht terugkaatst, verspreidt het zich en komt het aanmerkelijk verzwakt naar de aarde terug. Hoe zwakker het wordt, des te meer wordt het aangetast door de ongeordende ruis in de atmosfeer en in de circuits van de radarontvanger zelf.

Wiener had een speciale studie gemaakt van ongeordend gedrag tijdens zijn Cambridge-periode toen Bertrand Russell zijn aandacht had gevraagd voor enkele artikelen van Einstein, waarvan er een ging over Brownse beweging. Dit gaf uitzicht op nieuwe ideeën die Wiener in het bijzonder goed lagen. Later schreef hij dat ze 'in harmonie leken te zijn met een fundamenteel aspect van mijn eigen persoonlijkheid.' Brownse beweging is genoemd naar een achttiende-eeuwse botanicus, Robert Brown die, toen hij door een microscoop keek naar stuifmeelkorrels in een wateroplossing, opmerkte dat de korrels niet in stilstand waren, maar ononderbroken naar allerlei kanten bewogen als in een soort dans. Hoe warmer het water werd, des te sneller dansten de stuifmeelkorrels, maar niemand kon zeggen welke weg een bepaalde korrel zou volgen. De ene richting was even waarschijnlijk als de andere. Einstein toonde aan dat de Brownse beweging in feite werd veroorzaakt door stuifmeelkorrels die tegen talloze onzichtbare watermoleculen botsten. Een korrel wordt alle kanten uit geduwd, niet rechtstreeks door een enkele botsing, maar indirect als gevolg van het verschil in aantal stootjes dat het korreltje aan verschillende kanten krijgt.

Einstein ontdekte dat Brownse beweging een algemeen verschijnsel in de natuur is. De wiskunde die haar beschrijft stoelt niet op het simpele oorzaak-en-gevolg patroon, maar op kans en statistiek. Daarin school haar fascinatie voor wetenschappers in de twintigste eeuw, zelfs voor iemand als Einstein, die geloofde dat God geen dobbelspelletjes speelt met het universum.

Wiener echter had geen probleem met het denkbeeld van een dobbelende godheid. Vanaf zijn jeugd als wonderkind had hij elk formalisme dat zekerheid, volledigheid of determinisme deed vermoeden, verdacht gevonden. Hij had op tienjarige leeftijd een filosofisch essay geschreven over de Theorie der Onwetendheid, gebaseerd op de overtuiging dat een mechanisme dat zo ram-melt als de menselijke geest, geen theorie kan ontwerpen die helemaal af is en geen ruimte meer laat voor verandering. Met het verbreden van zijn wiskundige horizon realiseerde hij zich dat het vermogen het nieuwe te scheppen uit het oude in geen enkel behoorlijk opzicht kan bestaan in een wereld waarin alles noodzakelijk is en niets onzeker.

Zoals andere wetenschappers van zijn tijd zag Wiener in dat ruis in een radar-ontvanger, veroorzaakt door het ongeordend ophopen of uitdunnen van elektronenzwermen in de bedrading, leek op Brownse beweging en vatbaar was voor dezelfde wiskundige aanpak. Maar veel interessanter was het besef dat zowel het verzenden als het ontvangen van boodschappen een heleboel met Brownse beweging gemeen heeft. Van achttiende-eeuwse stuifmeelkorrels naar de communicatie van het computertijdperk mag misschien een grote sprong lijken, maar het verband is opmerkelijk en dat inzicht had belangrijke gevolgen. De verbindende schakel tussen die twee begrippen is de statistiek, een tak van de waarschijnlijkheidstheorie, die de grondgedachte werd achter een aantal van de meest diepgaande ontdekkingen in de moderne fysica.

Een boodschap is, zoals de weg van een stuifmeeldeeltje, een reeks gebeurtenissen verspreid in de tijd. Deze gebeurtenissen zijn vooraf niet volledig bekend. Het stijgen en dalen van de koers van een aandeel in de loop van een dag levert een soortgelijke reeks op. Wiskundigen noemen zo'n reeks 'stochastisch', naar het Griekse woord *stochos*, raden. De reeksen zijn niet altijd volledig onvoorspelbaar, maar ze bevatten wel een onbekend element. Niemand kan van een aandeel IBM met stelligheid verklaren tegen welke koers het twee uur later zal verkopen, maar hij kan er wel een gefundeerde slag naar slaan. Op ongeveer dezelfde manier is een Nederlandse zin een reeks letters en woorden die aan bepaalde statistische regels gehoorzaamt. In zichzelf is ze consistent, waardoor de zinsvolgorde niet helemaal onvoorspelbaar is voor iemand die de regels kent. Als de eerste helft van de zin is gegeven, is het mogelijk de tweede helft te raden, of daarbij dicht in de buurt te komen, of tenminste de volgende letter te voorspellen. Maar de essentie van een boodschap, de essentie van het schrijven van een volgende zin in het boek, is juist dat deze iets nieuws moet bevatten, iets onverwachts. Anders zou er in het geheel geen reden zijn ze te schrijven.

Alleen de waarschijnlijke weg van een in water zwevende stuifmeelkorrel, de waarschijnlijke schommelingen in de koers van een aandeel IBM of de waarschijnlijke optelling van letters en woorden op een bladzijde kan worden voorspeld. Bij het doen van zo'n voorspelling betreft een wiskundige niet één, maar een veelvoud van gelijktijdige toekomst, waarvan kan worden gezegd dat ze allemaal in theorie mogelijk zijn. De statistiek kan niets doen met een enkel gegeven. Een geïsoleerde gebeurtenis heeft geen betekenis. Ze moet deel uitmaken van een patroon van vele mogelijke gebeurtenissen, elk met een bepaalde realisatiekans.

In de mechanica van Newton heerste volledig determinisme. Men ging ervan uit dat als alles wat een lichaam nu doet bekend is, men precies kan voorspellen wat het op elk willekeurig tijdstip in de toekomst zal doen. Wiener bracht als zijn stellige overtuiging naar voren dat een wetenschapper nooit precies weet wat een deel van het universum doet op het moment dat we ernaar kijken. Daaruit volgt dat er geen hoop is op zekere en gedetailleerde kennis omtrent zijn toekomst. De wetenschapper moet proberen de onzekerheid ten aanzien van de toekomst te overwinnen door een reeks van verschil-

lende mogelijkheden te beschouwen en aan elke mogelijkheid een passende waarschijnlijkheid toe te kennen. Dan is hij in staat te zeggen wat onder deze of gene verzameling omstandigheden kan gebeuren.

Het voorspellen waar een Duits vliegtuig na een paar seconden zal zijn, zodat de kanonniers de granaat ervoor kunnen mikken en het doel raken, is een statistisch probleem. Het waarschijnlijke traject van het vliegtuig wordt behandeld als een van de vele mogelijke trajecten. Het scheiden van boodschap en ruis is eveneens een statistische opgave. De boodschappen vertonen een bepaald patroon dat verandert op een wijze die zeer ten dele wordt bepaald door de voorgeschiedenis.

Dat betekende een duidelijke breuk met het determinisme en dat was destijds een verrassende openbaring. In breder verband was het een bijdrage aan het begrippenkader van de nieuwe informatietheorie die drie jaar na de oorlog het toneel bestormde. De klassieke communicatietheorie waarvan de ondermijning in de jaren twintig was begonnen, was deterministisch, newtoniaans. Ze behandelde boodschappen als afzonderlijke gebeurtenissen. Net als Shannon, verbrak Wiener de ketenen van deze oude denkwijze. Hij beseftte dat het geen zin heeft te spreken over een vastgelegd stuk informatie: een signaal, een letter op een pagina, een flits op het radarscherm. In een gewoon gesprek wordt informatie overgedragen als de spreker iets zegt dat de kennis van de luisteraar verandert. Dit betekent dat de luisteraar in een toestand van onzekerheid verkeert omtrent de boodschap die hij zal vernemen. Wij zeggen liever 'onzekerheid' dan 'volledige onwetendheid', omdat hij tenminste weet dat de boodschap er een zal zijn uit een scala van mogelijke boodschappen. Ze kan uiterst onwaarschijnlijk zijn en daarom erg moeilijk voorspelbaar of juist hoogst waarschijnlijk zijn, in welk geval de luisteraar ze gemakkelijk had kunnen voorspellen. Maar de boodschap zal niet onmogelijk zijn in de zin dat ze de regels van de grammatica of de betekenis grof schendt; anders kan ze niet eens informatie genoemd worden. Net zoals in de grafieken en tabellen van de statisticus, ligt in de geest van de luisteraar een aantal mogelijkheden of contingenties opgeslagen, de een wat waarschijnlijker dan de andere. Wanneer de spreker zijn boodschap verzendt, maakt hij een van die mogelijkheden actueel door andere uit te sluiten en daarmee de onzekerheid van de luisteraar weg te nemen.

We moeten echter zorgvuldig het feit onder ogen zien dat een grotere mate van onzekerheid wordt weggenomen als de gekozen boodschap er een is uit een groot aantal mogelijke boodschappen en als het een van de meer onwaarschijnlijke van deze mogelijkheden is. Om juist die reden moet een werkelijke boodschap niet op zichzelf worden gezien, maar in relatie tot alle mogelijke boodschappen, precies zoals de werkelijke koers van een vliegtuig deel uitmaakt van een patroon dat andere mogelijke koersen omvat. Dit gegeven is van cruciaal belang in de informatietheorie, die tot op het bot statistisch van aard is. De grote detectiveschrijvers - om nog een ander voorbeeld te geven - doen hun uiterste best de lezer tot het allerlaatst in onzekerheid te laten, totdat

blijkt dat de schurk, eindelijk ontmaskerd, een mogelijke verdachte is geweest, zij het een hoogst onwaarschijnlijke.

Wiener werkte aan het voorspellingsprobleem alsof de afloop van de oorlog afhing van zijn succes. Hij nam benzedrine om wakker te blijven bij marathonsessies van een hele nacht die niet eens echt nodig waren en maakte zich vervolgens ongerust over het mogelijke effect van dit soort inspanningen op zijn toch al zeer beperkte vermogen om militaire geheimen te bewaren (het vuurgeleidingsprogramma was topgeheim). Collega-onderzoekers die dichterbij het vuur stonden, vonden de wijze waarop Wiener het belang van de eigen rol opklopte wel vermakelijk. Edward Poitras, een van de vier leden van de commissie die het onderzoek van het project leidde, herinnert zich dat Wiener nogal eens naar een schietbaan in Fort Monroe ging om 'gevoel te krijgen' voor de kanonnen bij het afvuren. Poitras nam die bezoeken niet helemaal serieus. 'We leidden Wiener rond, probeerden ernstig te blijven en hielden zijn hand vast alsof hij een kind was,' zei hij. 'Hij was een vreemde vogel. Zijn aandeel in het project was in werkelijkheid nogal gering en perifeer.'

Wiener zette zijn ideeën uiteen in een geheim rapport aan de National Defense Research Committee, dat later onder zijn collega-wetenschappers circuleerde. In dit selecte gezelschap heette dit het Gele Gevaar, door de kleur van het omslag en de tot nederigheid stemmende moeilijkheidsgraad van de inhoud. Wieners behandeling had een zo ijle hoogte bereikt dat een deel van het rapport zelfs voor de knapste technisch specialisten ontoegankelijk was.

Het Gele Gevaar, dat eigenlijk was geschreven door Julian Bigelow aan de hand van notities die hij van Wieners aantekeningen op het schoolbord van Kamer 2-224 in het MIT had gemaakt, was een belangrijke bijdrage aan een wezenlijk aspect van de informatietheorie. Wiener duidde zijn eigen werk echter niet aan als een communicatietheorie.

Het verband met de informatietheorie was in het Gele Gevaar eerder impliciet dan expliciet. 'Wiener werd nooit zo onomwonden feitelijk dat hij zaken besprak als "kanaalcapaciteit", "bron-entropie" of "boodschapcodering", zaken waarop Shannon zijn theorie bouwde,' zegt Bigelow. 'Wieners begrippen bestonden uit de Brownse beweging, "discrete chaos" en "lineaire operatoren". Deze waren begrijpelijker voor de wiskundigen dan voor de communicatiewetenschappers van toen. Twee of drie decennia later zag men in dat Wieners werk van betekenis was voor een belangrijk aspect van de communicatietheorie, maar men zou kunnen zeggen dat zijn inzichten gemaskeerd werden door zijn behoefte ze in een wiskundige vorm te gieten die nogal ver bij de praktijk vandaan stond.'

Hoe dan ook, het in de Verenigde Staten ontworpen elektrische richtinstrument werd in augustus 1944 aan de Engelse oostkust in gebruik genomen, minder dan twee maanden nadat de eerste golf Duitse vliegende bommen in

de lucht waren verschenen. Het bracht een verrassende verbetering in de precisie teweeg. Vóór de installatie werd maar 10% van de onbemande V-1's door grondgeschut omlaag gehaald; daarna steeg dit percentage tot 50. Hoe groot Wieners aandeel in dit praktische succes was, is een open vraag, maar hij was veel eerder in zijn onderzoek tot de conclusie gekomen dat er een venster was geopend dat uitzicht op een nieuw intellectueel landschap bood. 'Het was me vrijwel vanaf het allereerste begin duidelijk,' schreef hij in zijn memoires, 'dat deze nieuwe begrippen communicatie en controle een nieuwe interpretatie van de mens, van de menselijke kennis van het universum en van de samenleving in zich droegen.'

2. DE RUIS VAN WARMTE

Het woord 'entropie' torst een grote historische lading degelijke natuurkunde, diepzinnige paradoxen, dubieuze analogieën en flarden metafysische fantasieën. Aanvankelijk was Shannon niet van plan zo'n zwaar beladen term voor zijn informatiemaat te gebruiken. Hij dacht dat onzekerheid een goed woord zou zijn. Maar hij veranderde van gedachten na een discussie met John von Neumann, de wiskundige wiens naam onlosmakelijk is verbonden met een deel van het belangrijkste theoretische werk uit de eerste helft van de twintigste eeuw. Von Neumann stelde Shannon voor zijn maat 'entropie' te noemen, aangezien 'niemand weet wat entropie is, zodat je in een debat altijd in het voordeel bent.' Dat was een grapje, maar het deed niets af aan het feit dat entropie in de verschillende stadia van haar geschiedenis op tal van manieren is gedefinieerd. Het debat over haar werkelijke aard is na meer dan een eeuw van onderzoek en discussie nog steeds niet beslist. Desondanks hebben generaties wetenschappers het begrip 'entropie' gebruikt, zonder ook maar een ogenblik stil te blijven staan bij zijn wankele theoretische onderbouwing.

Een deel van de narigheid ontstaat doordat entropie, terwijl het iets zegt over de fysische toestand van een natuurlijk systeem, tevens een maat is voor de wanorde van dat systeem en wanorde geen zuiver objectieve eigenschap is. De menselijke waarnemer kan niet volledig worden uitgesloten, omdat het idee van orde onlosmakelijk is verbonden met het geestelijk bewustzijn. En in de hersenen van de waarnemer heerst tot op zekere hoogte ook verwarring. Wat voor de een wanorde is, kan voor de ander orde zijn, afhankelijk van de vraag hoeveel kennis die persoon bezit omtrent de details van de ogenschijnlijke verwarring. Mijn bureau mag u een rommeltje toeschijnen, maar ik ken er mijn weg. Voor mij is zijn entropie laag. Dit leidt tot vragen van het type dat de waarschijnlijkheidstheorie lang heeft geplaagd: is entropie stoffelijk of geestelijk, fysiek of abstract? Olivier Costa de Beauregard, de Franse theoretisch natuurkundige, antwoordt daarop dat entropie tegelijkertijd subjectief en objectief is. Entropie is een aspect van de waarschijnlijkheid en waarschijnlijkheid, zo stelt Beauregard vast, werkt als een scharnier tussen materie en geest, daar waar de een met de andere is verbonden en zij op elkaar reageren.

Entropie is objectief in de volgende hoogst belangrijke betekenis: als de entropie van enig gesloten systeem een maximum bereikt, is dat systeem niet meer in staat tot iets interessants, nieuws of nuttigs. Warmte kan alleen een motor aandrijven wanneer die een hogere temperatuur heeft dan zijn omgeving. Ze moet de temperatuurhelling 'af dalen' om een wiel te kunnen laten draaien, zoals water dat van een hoogte stroomt. Dit betekent dat de warmtebron los moet staan van de rest van het systeem, zodat de energieopstelling tot op zekere hoogte 'geordend' is: hoge temperatuur hier, lagere temperatuur daar en een welomschreven scheidslijn ertussen. Wanneer de brandstof op is

en het hele systeem overal dezelfde temperatuur heeft, zijn alle moleculen in een willekeurige wanorde gemengd: de motor doet het niet.

Evenmin als een waterrad kan draaien als het water overal even hoog staat, kunnen mensen overleven zonder de eenrichtingstroom van zonne-energie. Het is de onevenwichtigheid tussen de hete zon en de koele ruimte die de grote motor van de natuur en de beschaving op deze planeet aandrijft. Wanneer de zon is opgebrand en deze levengevende asymmetrie in temperatuur ophoudt te bestaan, zal de gelijkheid de levensvormen met al hun weelde aan ingewikkelde orde doen verdwijnen. Dan zal in het heelal dezelfde hoeveelheid energie bestaan, omdat energie wordt geschapen noch vernietigd; maar het zal wanordelijke energie zijn, in een toestand van hoge entropie die als zodanig niet kan worden gebruikt voor welk constructief doel dan ook. Ze wordt niet weggevaagd, ze zal alleen ontoegankelijk zijn.

Een systeem in een toestand van maximale entropie is een gisting van voortdurende verandering onder het zichtbare oppervlak, waar moleculen in willekeurige wanorde heen en weer bewegen en op elkaar botsen; het systeem heeft zijn tegenstellingen verloren, zijn ordelijke rangschikking die het een mogelijkheid bood om een bepaalde taak te verrichten. Het heeft zijn waarde verloren. De ene plek van het systeem is gelijk aan welke andere dan ook en deze eenvormigheid maakt het ongeschikt om iets uit te richten dat vanuit menselijk gezichtspunt van belang is. De wervelwind van verandering onder het oppervlak produceert geen waarneembare verandering aan het oppervlak zelf, maar betekent alleen dat het allemaal een pot nat is, hoe lang men er ook naar blijft kijken.

In overdrachtelijke zin lijkt een thermodynamisch systeem in een toestand van lage entropie (dat wil zeggen met een ordelijke scheiding van hoge en lage temperaturen) op een boodschap, terwijl hetzelfde systeem in een toestand van hoge entropie (waarin alle verschillen zijn genivelleerd) op ruis lijkt. Een glas water met ijsblokjes vertoont een duidelijk onderscheid tussen zijn warme en zijn koude delen. Zijn entropie is laag, omdat de moleculen waaruit het is samengesteld niet op alle mogelijke manieren vermengd kunnen raken. Later zal de entropie van de inhoud van het glas tot een maximum stijgen. De ijsblokjes zullen oplossen en het water zal tot rust komen bij een temperatuur die overal gelijk is.

Over de inhoud van het glas voordat de ijsblokjes waren verdwenen, valt meer op te merken. De inhoud gaf een 'boodschap' door over de rangschikking van de verschillende delen van het systeem. Nadat het ijs is gesmolten, kunnen we er alleen maar van zeggen dat het een glas water op kamertemperatuur is. De ijsmoleculen zijn zonder onderscheid met de watermoleculen vermengd, zodat het enige dat ze aan de waarnemer overdragen een betekenisloze 'ruis' is. Daarvoor konden we binnen ruime grenzen weten waar elk soort molecule was. Er heerste orde. Als die orde verdwijnt heeft de waarnemer minder informatie over het systeem als geheel. Wanneer een radiostation een nieuwsprogramma uitzendt, is de luisteraar volledig bekend met hetgeen de nieuwslezer zegt, omdat de woorden en zinnen specifiek en regelmatig geor-

dend zijn, terwijl de atmosferische ruis op de achtergrond alleen maar zoe-
mende verwarring is, het enige dat de luisteraar ervan kan zeggen. Er is meer
tijd nodig om de boodschap te beschrijven dan de ruis, omdat we alles weten
van de interne orde van de eerste en niets omtrent de interne wanorde van de
tweede.

Het is boeiend om te zien hoe tijdens de ontwikkeling van de theorie van de
thermodynamica het brandpunt van de belangstelling verschoof van wat een
systeem kan doen naar wat een waarnemer van een systeem kan weten.

De eerste flauwe glimp van begrip van het entropieprincipe was in de negen-
tiende eeuw te danken aan een jonge, veelbelovende Fransman, wiens kwali-
teiten nooit geheel tot ontplooiing zouden komen: Sadi Carnot, zoon van
Napoleons minister van oorlog. Carnot, genoemd naar een middeleeuwse
Perzische dichter, was een ingenieur met oog voor de noodzaak machines
meer werk voor minder geld te laten doen en met een opmerkelijke visie op de
geweldige veranderingen die de nieuwe wereld van op energie gebaseerde
technologie teweeg zou brengen.

Er bestond toen geen noemenswaardige theorie op het gebied van stoom-
machines. De beste machines, gebruikt om water uit de tin- en kopermijnen in
Cornwall te pompen, konden slechts 5% van de warmte-energie in hun ketels
omzetten in arbeid. Carnot beschikte over een uitstekend theoretisch inzicht
dat hem in staat stelde door de oppervlakkige warboel heen te zien en door te
dringen tot de essentie van het probleem via het bepalen van algemene waar-
heden. Hij idealiseerde de warmtemachines, ongeveer zoals Shannon een
communicatiesysteem idealiseerde, zodat zijn bevindingen zo breed mogelijk
van toepassing waren op alle soorten machines ongeacht de brandstof die zij
gebruikten.

Carnot presenteerde zijn conclusie in een memorandum *Bespiegelingen
over de bewegingsmacht van vuur*, dat hij op achtentwintigjarige leeftijd in
een klein Parijs appartement schreef. In het memorandum, gepubliceerd in
1824, liet Carnot zien dat warmte alleen dan arbeid kan verrichten wanneer ze
van een hogere naar een lagere temperatuur afneemt. Er moest dus een tempe-
ratuurverschil bestaan. Het is de hoeveelheid warmte en de 'hoogte van haar
val' die bepalen hoeveel mechanische arbeid kan worden verricht.

Op dit punt in zijn korte leven wist Carnot niet wat warmte was. Hij onder-
schreef zonder veel overtuiging het algemene standpunt van zijn tijd dat
warmte een gewichtloze vloeistof was die vaste lichamen in- en uitstroomde,
zodat de analogie met een waterrad erg sterk leek op dat wat volgens hem in
een stoommachine gebeurde. Later verliet hij de vloeistoftheorie en kwam tot
de conclusie dat warmte eenvoudig de beweging van materiedeeltjes is, maar
deze ontdekking vertrouwde Carnot slechts toe aan zijn persoonlijke aan-
tekenboekjes, die pas in 1872 werden gepubliceerd toen de wetenschap van de

thermodynamica al ver was gevorderd. Carnot zelf stierf op zesendertigjarige leeftijd tijdens een cholera-epidemie.

Carnot nam ook aan, ten onrechte zoals later bleek, dat warmte zonder verliezen van de ketel naar de condensor omlaag stroomt. Hij geloofde dat er aan het eind van het proces evenveel warmte was als aan het begin. Pas in het midden van de negentiende eeuw werd duidelijk aangetoond dat dit niet het geval is. In werkelijkheid wordt een deel van de warmte wordt omgezet in de mechanische arbeid voor het aandrijven van de zuigers van de machine, terwijl een ander deel rechtstreeks wordt overgedragen aan de wanden van de condensor. Zelfs in een volmaakt geconstrueerde machine wordt slechts een beperkte hoeveelheid van de warmte-energie voor de aandrijving gebruikt, de rest gaat verloren en valt onbenut van de temperatuurgradiënt af.

In de loop van de negentiende eeuw begonnen de theoretici geleidelijk te beseffen dat energie niet kan worden vernietigd. De hoeveelheid energie in het universum verandert niet. Energie kan echter van vorm veranderen en met een vaste omzettingssnelheid worden omgezet in energie van een andere soort. Warmte is een van deze vormen, net als arbeid. Andere energievormen zijn licht, elektriciteit en chemische processen. Het belangrijke punt echter is dat deze verschillende vormen niet allemaal even goed beide richtingen uit werken: ze zijn niet volledig omkeerbaar. Wanneer een auto plotseling remt, stopt zijn voorwaartse beweging, maar de mechanische energie die hem voorwaarts bewoog verdwijnt niet zonder meer. Ze wordt volledig omgezet in warmte-energie, in de vorm van wrijving in remmen, banden, de vering en andere delen van de auto en in de ondergrond. Die energie is niet bruikbaar omdat, zoals we hebben gezien, warmte niet opnieuw kan worden omgezet in mechanische arbeid tenzij een temperatuursgradiënt wordt geschapen en zelfs dan gaat er wat verloren. Als een heet lichaam naast een koud lichaam wordt gezet, zal de warmte ook van de gradiënt afvallen en zo het verschil in temperatuur nivelleren zonder enige arbeid te verrichten. Weldra begreep men dat warmte slechts met moeite, en bovendien nooit volledig, kan worden omgezet in bruikbare mechanische arbeid en dat arbeid maar al te gemakkelijk volledig en voorgoed in warmte kan worden omgezet.

Rudolf Clausius was de man die de hele thermodynamica (letterlijk: 'warmtebeweging') op een nieuw niveau van verfijning bracht door het gedrag van energie uit te drukken in twee wetten. De eerste hoofdwet van de thermodynamica zegt dat energie altijd behouden blijft: ze kan niet ontstaan, noch vernietigd worden. De tweede hoofdwet zegt dat, hoewel energie in haar totale hoeveelheid niet verandert, ze wel aan kwaliteit kan verliezen. Clausius gaf aan de mate van kwaliteitsverlies de naam 'entropie', van een Grieks grondwoord dat 'transformatie' betekent. Voor Clausius was entropie een relatie tussen warmte en temperatuur. Ze werd uitgedrukt in een quotiënt: warmte gedeeld door temperatuur. Wanneer een hoeveelheid warmte uit een heet

lichaam stroomt, neemt zijn entropie af met de hoeveelheid warmte gedeeld door de oorspronkelijke temperatuur van het hete lichaam. Wanneer diezelfde hoeveelheid warmte een koel lichaam binnenstroomt, neemt zijn entropie toe met de hoeveelheid warmte gedeeld door de oorspronkelijke temperatuur van het koele lichaam. Aangezien de temperatuur in het eerste geval hoger is dan in het tweede, is de afname van de entropie kleiner dan de toename; bij de overdracht ontstaat dus een nettowinst aan entropie. Deze winst treedt telkens op wanneer warmte van een hogere naar een lagere temperatuur stroomt en aangezien er niets nuttigs of interessants gebeurt tenzij warmte deze afdaling maakt, worden alle interessante en nuttige dingen vergezeld door een niet omkeerbare toename van de entropie. Clausius vatte zijn conclusies samen in de beroemde strofen:

*De energie van het heelal is een constante.
De entropie van het heelal streeft naar een maximum.*

Waarom leed energie aan dit curieuze eenrichtingverval, dit verlies van waarde, zowel in natuurlijke omstandigheden als in kunstmatige? De eerste thermodynamici waren er tevreden mee entropie te beschouwen als een oppervlakkige en algemene eigenschap, zoals temperatuur of druk. Een thermodynamisch systeem ontwikkelde zich op den duur van de ene toestand naar de andere en deze werkers waren vooral in de toestanden geïnteresseerd. Latere onderzoekers probeerden de sluier weg te nemen rond het mysterie van wat er gebeurde bij de overgang van de ene naar de andere toestand en het onzichtbare mechanisme te begrijpen dat verantwoordelijk is voor de niet-omkeerbare toename van de entropie. Als Newton een mechanische verklaring kon geven voor de beweging van de hemellichamen waarvan men vroeger dacht dat ze door God langs voorbestemde banen werden geleid, zou het dan niet mogelijk zijn het raadsel van de energietransformatie begrijpelijk te maken via gelijksoortige, rationele methoden?

Bij deze onderneming was Ludwig Boltzmann de oorspronkelijkste en meest succesvolle denker. Boltzmann was een lichtende en tragische figuur in het landschap van de natuurkunde van zijn tijd. Hij was een warm bewonderaar van de Duitse romantische dichters, van Schiller in het bijzonder, en als kind had hij pianoles gehad van Anton Bruckner, maar zijn benadering van de studie der natuur had iets dat niet was te verzoenen met de metafysica. Hij zag de metafysica als een geestelijke hoofdpijn en hij had alleen maar verachting voor idealistische filosofen; hij beschreef Schopenhauer door diens eigen beschrijving van Hegel tegen hem te keren: 'een domme, onwetende filosoof die flauwekul neerkrabbelt en een stortvloed van holle woorden laat stromen, waardoor de menselijke hersens grondig en voorgoed wegrotten.' Als atomist vond hij een stroming tegenover zich die aan het eind van de negentiende eeuw uiterst invloedrijk was en die energie beschouwde als een continue stroom in plaats van als de beweging van onzichtbare deeltjes in de microcosmos. Deze anti-atomisten geloofden dat de enige kennis die in de

wetenschap mogelijk is, de kennis is van onze zintuiglijke indrukken en van bepaalde constante wiskundige betrekkingen ertussen. Ze stelden dat er geen hoop is op de ontdekking van een diepere werkelijkheid achter en onder dat wat kan worden waargenomen en ervaren. Boltzmann, van nature twistziek en strijdlustig, geloofde in de onophoudelijke strijd voor zijn atomische overtuigingen en hield deze dapper tot op hoge leeftijd vol totdat hij zich, ziekelijk, bijna blind en met het tij van de wetenschappelijke mode tegen, verhing in een pension aan de Adriatische kust van Italië.

Boltzmann was de kampioen van de atomistische theorie, maar niet omdat hij ervan overtuigd was dat het de enig mogelijke theorie was of omdat hij vasthield aan het werkelijke fysische bestaan van atomen. De reden voor zijn strijd om acceptatie van de theorie was zijn overtuiging dat ze de beste verklaring bood voor het gedrag van materie. Hij betoogde dat het een illusie is te veronderstellen dat niemand de natuur kan beschrijven zonder daarbij aan de ervaring voorbij te gaan, omdat alle vergelijkingen de natuur onvermijdelijk in een abstracte vorm weergeven met de nadruk op de gemeenschappelijke kenmerken van haar verschillende processen en de verwaarlozing van hun verschillen. 'Slechts de helft van onze ervaringen wordt ooit ervaren,' zei Boltzmann in navolging van Goethe. Het denken voegt altijd iets toe aan de ervaring en schept een geestelijk beeld dat niet een eenvoudige of eenmalige ervaring is, maar een brede scala van ervaringen vertegenwoordigt. Door dat beeld te gebruiken kan men voorspellen wat er in de toekomst zal gebeuren en iets beschrijven wat nog niet ervaren is.

Het geestelijk beeld dat Boltzmann zo geschikt vond voor de verklaring van de tweede hoofdwet van de thermodynamica was het beeld van onzichtbare deeltjes in de microkosmos van de materie. Warmte komt voort uit de geëxciteerde beweging van deze deeltjes, zodat de thermodynamica, de beweging van warmte, eigenlijk de dynamiek van de beweging zou moeten zijn. Boltzmann bouwde voort op het werk van de Schotse theoretische natuurkundige James Clerk Maxwell, die als jongeman op Cambridge een prijs had gewonnen voor een essay over de ringen van de planeet Saturnus. In dit essay liet Maxwell zien dat de enig mogelijke verklaring voor de stabiliteit en de beweging van Saturnus' ringen ligt in de acceptatie dat zij een systeem van afzonderlijke deeltjes zijn, in plaats van een vloeistof of de een of andere ononderbroken substantie, zoals uit waarnemingen naar voren zou kunnen komen. Het succes van dit artikel bracht Maxwell ertoe gassen te behandelen als verzamelingen minuscule deeltjes, die met verschillende snelheden heen en weer schieten en op elkaar botsen. In een heet gas bewegen de deeltjes heel snel, terwijl hun snelheden in een koel gas lager liggen. Aangezien het onmogelijk is de exacte snelheid van elk deeltje te bepalen, behandelde Maxwell de hele verzameling deeltjes statistisch.

In 1859, toen Boltzmann nog maar vijftien jaar was, kwam Maxwell met een artikel dat een mijlpaal in de wetenschap werd. Door de meest waarschijnlijke snelheden van gasdeeltjes bij een gegeven temperatuur te berekenen, bewees Maxwell dat het mogelijk was informatie te verkrijgen over het gedrag

van het gas in zijn geheel en over zijn grootschalige, meetbare eigenschappen zoals druk en viscositeit. Het artikel kwam als eerste met een natuurwet die niet was gesteld in absolute en uitzonderingloze termen, maar slechts in statistische. De wet bepaalde niet dat dit of dat moest gebeuren, dat een specifieke oorzaak tot één uniek gevolg leidde. Ze zei slechts dat in een systeem dat bestaat uit grote aantallen deeltjes de kennis over het waarschijnlijke gedrag van de deeltjes voert tot kennis over de algemene eigenschappen van het geheel.

Boltzmann las Maxwells artikelen jaren later en gebruikte diens statistische methoden om te komen tot een nieuwe en meer algemene behandeling van de entropie, uitsluitend gebaseerd op waarschijnlijkheid. Zijn eerdere ideeën over het onderwerp waren ontleend aan de mechanica, waardoor de minuscule deeltjes die de materie vormen verondersteld werden zich ongeveer als Newtons hemellichamen te gedragen en zich aan diezelfde wetten te houden. Het probleem is dat zo'n behandeling geen verklaring geeft waarom een thermodynamisch systeem zich ontwikkelt naar een toestand van maximale entropie en daarin blijft; volgens Newtons mechanica kan een lichaam zijn oorspronkelijke weg precies opnieuw afleggen en naar zijn beginpositie terugkeren. Als dus elk deeltje in een systeem in staat is zijn beweging exact om te keren, waarom zou het hele systeem dan niet tot zijn oorspronkelijke toestand kunnen terugkeren? Met het vorderen van zijn werk loste Boltzmann dit dilemma op door van entropie de statistische eigenschap van een enorm aantal deeltjes te maken, waardoor het onomkeerbare voortschrijden naar grotere wanorde weliswaar slechts waarschijnlijk is, maar desalniettemin zo overstelpend waarschijnlijk, dat het in alle praktische gevallen zekerheid is. In principe is er niets dat de deeltjes weerhoudt op hun schreden terug te keren en spontaan van wanorde naar orde terug te gaan, zoals in Newtons mechanica, maar zo'n voorval zou even zeldzaam zijn als een ketel met water dat op een brandend fornuis bevroest in plaats van kookt. Het is dermate onwaarschijnlijk dat het niet loont erbij stil te staan.

Binnen dit nieuwe kader is entropie de toename van de wanorde onder de deeltjes. In de evenwichtstoestand (als de entropie maximaal is) heerst de grootst mogelijke wanorde. Het nog verder vermengen van de deeltjes verandert daar niets aan; het is net zo zinloos een grondig geschud pak speelkaarten nog langer te schudden. De wanorde wordt er niet groter van en het is buitengewoon onwaarschijnlijk dat de kaarten door het extra-schudden weer op hun oorspronkelijke volgorde komen te liggen. Onomkeerbare wanorde is slechts waarschijnlijk, niet zeker, maar de wetten der waarschijnlijkheid zijn zo machtig dat ze in de ervaringswereld neerkomen op grondbeginselen. Dat Wetten en Feiten in de thermodynamica enigszins met elkaar in tegenspraak zijn, is belangrijk voor theoretici en filosofen, maar niet voor ingenieurs.

Warmte is in wezen slordig. Het is de rommeligste vorm van energie. Maar alle andere energievormen worden bij gebruik omgezet in warmte, zodat alle

energie in het heelal de neiging heeft in een toestand van wanorde terecht te komen. Door haar willekeurige karakter kan warmte - zelfs in samengebalde vorm, bijvoorbeeld in de ketel van een stoommachine - niet voor honderd procent in mechanische arbeid worden omgezet. Alleen als alle moleculen in de warmtebron gericht konden worden en ertoe worden overgehaald in dezelfde richting te bewegen om zo een zuiger naar beneden te duwen, zou de hele hoeveelheid warmte in arbeid worden omgezet. Maar dat is onmogelijk. Juist doordat de moleculen van een heet gas allemaal trillen, draaien, botsen en alle kanten uitschieten, wordt slechts een gedeelte van hun energie voor het aandrijven van de machine aangewend. Het gas in de cilinder zet uit en oefent zo een kracht uit op de zuiger waardoor die zich in een geordende richting gaat bewegen. Toch lijkt het gedrag van het gas meer op het gedrag van een mensenmassa in een beperkte ruimte dan op dat van een peloton gedisciplineerde soldaten die gezamenlijk naar een doel marcheren. Het totale effect van de heen en weer hollende mensen in hun beperkte ruimte is het geduw tegen de zuiger, maar veel individuele moleculen verspillen hun energie aan willekeurige bewegingen in allerlei richtingen.

Zoals Boltzmann het in 1886 stelde in een lezing voor de Keizerlijke Academie van Wetenschappen:

Juist de vormen van energie die we in de praktijk willen verwezenlijken zijn echter altijd onwaarschijnlijk. We willen bijvoorbeeld dat een lichaam als geheel beweegt; dit vereist dat al zijn moleculen dezelfde snelheid en dezelfde richting hebben. Als we moleculen als onafhankelijke individuen beschouwen is dat echter het toppunt van onwaarschijnlijkheid. Het is algemeen bekend hoe moeilijk het is zelfs een niet al te groot aantal onafhankelijke individuen ertoe te brengen precies hetzelfde te doen op precies dezelfde manier.

Dit betekent dat het bewerkstelligen van een ordelijk proces onevenredig duur is. De econoom Nicholas Georgescu-Roegen heeft eens geschreven: 'Economen zeggen graag "Er bestaat niet zoiets als een gratis lunch"; alles moet naar zijn waarde worden betaald, zodat prijs en waarde elkaar steeds in evenwicht houden. De wet van de entropie leert ons dat de mensheid onder een straffer regime leeft: in termen van *entropie* zijn de kosten van een lunch hoger dan zijn prijs.'

In de kern van de tweede hoofdwet schuilt het inzicht dat orde waarde heeft. Orde maakt het ontstaan van nieuwe vormen uit oude mogelijk; ze maakt leven en geciviliseerde samenlevingen mogelijk. En ze is nauw verbonden met betekenis. Wanneer een systeem in evenwicht verkeert, is onder het oppervlak een enorme hoeveelheid verandering op deeltjesniveau gaande. Maar vanuit menselijk gezichtspunt zijn dit nutteloze, alledaagse veranderingen die niets van belang opleveren. En inderdaad lijkt aan het oppervlak geen enkele wijziging op te treden. Ook in een ander opzicht is orde waardevol, omdat ze veel moeilijker kan worden geproduceerd dan wanorde. Chaos is de gemakkelijkste, meest voorspelbare en waarschijnlijkste toestand en duurt onbeperkt. Orde is onwaarschijnlijk en moeizaam tot stand te brengen. De tijd is haar vijand,

omdat de entropie geneigd is met de tijd toe te nemen. Ordelijke energie kan arbeid verrichten, maar juist tijdens dit arbeidsproces vervalt ze tot wanordelijke energie. In feite creëert ze ten slotte meer wanorde dan orde.

3. DE DEMON ONTTROOND

Er kan een merkwaardige parallel worden waargenomen tussen Boltzmanns werk op het gebied van entropie en de ideeën van onderzoekers naar het karakter van energie vroeg in de vorige eeuw. In Carnots verhandeling lag de ontdekking besloten dat er grenzen bestaan aan hetgeen mensen met energie kunnen doen. Ze kunnen haar niet geheel transformeren in arbeid. In Boltzmanns versie van het entropieprincipe is het inzicht besloten dat er grenzen bestaan aan hetgeen menselijke waarnemers kunnen weten over een systeem waarin energie een transformatie ondergaat.

De nadruk werd verlegd van arbeid naar informatie. Wanneer een systeem ordelijk is en daarom onwaarschijnlijk, het een lage entropie heeft en rijk aan macroscopische structuur is, kunnen we er meer van weten dan wanneer het wanordelijk is en een hoge entropie heeft. In evenwicht, als onder het oppervlak op microscopische schaal de grootste verandering optreedt maar de menselijke waarnemer slechts 'onveranderlijkheid' ziet, weten we het minst over de ordening van de delen van het systeem, waar elk deel zich bevindt en wat het doet.

Als warm water eerst in een bad met koud water stroomt, bevinden de meeste snelle moleculen zich in het warme deel en de meeste langzame moleculen zich in het koude. Het contrast is duidelijk genoeg om zintuiglijk te worden waargenomen. Die geordende structuur is de 'boodschap' die ze overbrengt. Maar na een tijdje is al het water in het bad lauwwarm. De snelle en de langzame moleculen zijn volledig vermengd in een onophoudelijk veranderende verwarring en een waarnemer kan ze onmogelijk allemaal bijhouden. Aangezien de veranderingen die ze ondergaan willekeurig zijn, gehoorzamen ze geen regels. In deze toestand lijkt het bad op ruis. Boltzmann liet zien dat mensen niet kunnen (en evenmin moeten willen) weten wat elk individueel molecuul - bijvoorbeeld in het badwater - op een bepaald moment doet. Zij kunnen alleen weten hoe gigantische verzamelingen deeltjes - aan elke kant van het bad - zich gemiddeld gedragen. Als echter een systeem meer in wanorde raakt en zijn entropie toeneemt, verdwijnt zelfs deze beperkte kennis.

Pas vele jaren later werd het verband tussen de toename van entropie en de afname van kennis expliciet gemaakt. Boltzmann zelf was zich van dit verband bewust, maar verwees er slechts kort en terloops naar. In 1894 plaatste hij een intellectuele tijdbom met de opmerking dat entropie verwant is aan 'ontbrekende informatie'. Met deze ene uitspraak stak hij de brug over die entropie, met al haar Victoriaanse bagage van samenhangende ideeën, verbindt met informatie, het nieuwe begrip dat zo goed past bij de geest van de late jaren van de twintigste eeuw.

Een andere manier om de tweede hoofdwet van de thermodynamica te benaderen is deze: hoe hoger de entropie, des te meer mogelijke manieren om de verschillende delen van het systeem te ordenen. Bij deze aanpak is de relatie tussen entropie en waarschijnlijkheid glashelder: als bij hoge entropie veel ordeningsmogelijkheden zijn, is het *onwaarschijnlijk* dat op een zeer bepaald tijdstip, een zeer bepaalde ordening zal worden aangetroffen. Dat is net zo onredelijk als van een pak speelkaarten te verwachten dat het tijdens het schudden terugkeert in zijn oorspronkelijke volgorde, die slechts een unieke volgorde uit een astronomisch aantal mogelijkheden is. Een warboel is waarschijnlijker dan een bepaalde 'orde', omdat er nu eenmaal meer, doorgaans zelfs veel meer, manieren zijn waarop een warboel tot stand kan komen dan manieren waarop een geordende structuur kan ontstaan. De onderdelen van een piano kunnen op oneindig veel manieren worden rondgestrooid, maar er is er slechts één om ze allemaal weer in elkaar te zetten. Het spreekt vanzelf dat de in elkaar gezette piano waardevoller en interessanter is dan de losse onderdelen. Dit gaat ook op voor de woorden van een taal die niet willekeurig aan elkaar geregen zijn, maar zich houden aan bepaalde structuurregels.

Neem bijvoorbeeld de volgende omschrijving in een cryptogram: 'Zo zij het met name een verandering' (vier letters). Het juiste antwoord is duidelijk een anagram (een verandering) van het woord 'name' dat de betekenis van 'zo zij het' of 'het zij zo' moet hebben. Kennelijk is het gevraagde woord 'amen'. Maar hoe groot is de *waarschijnlijkheid* om door de letters lukraak te verschuiven op het goede antwoord te komen? Er zijn vierentwintig verschillende manieren om de vier letters van het anagram te groeperen. Behalve de woorden 'name' en 'amen' leveren deze combinaties alleen nog het dichterlijke woord 'mane' op; de overige eenentwintig combinaties zijn onzin-woorden. Dit betekent dat bij een willekeurige verschuiving van de letters de kans om door puur toeval op het juiste woord 'amen' te komen een op vierentwintig is. De kans op vorming van een min of meer zinnig woord ligt iets gunstiger: drie op vierentwintig of een op acht. De kans een onzin-woord te vormen is daarentegen behoorlijk groot: zeven op acht.

In een thermodynamisch systeem waarin moleculen in plaats van letters heen en weer worden geschoven, geldt ongeveer hetzelfde principe. Wanneer de warmte in een deel van het systeem is geconcentreerd, zodat zij kan 'afdal' naar een koelere plek en nuttig werk kan doen, is er een zekere mate van orde, vergelijkbaar met door elkaar gehusselde letters die een zinnig woord vormen. Dit is een onwaarschijnlijke gang van zaken, zoals we al hebben gezien. De meest waarschijnlijke toestand wanneer alle delen van het systeem willekeurig door elkaar liggen, is er een van 'ruis' en onzin. In het thermodynamische geval wordt een onwaarschijnlijke rangschikking van de moleculen geassocieerd met het vermogen arbeid te verrichten. In het geval van het anagram wordt het geassocieerd met het vermogen betekenis over te dragen. Informatie is evenals entropie nauw verbonden met verscheidenheid. In ons voorbeeld bestaat een woord zonder betekenis uit dezelfde vier letters als een betekenisdragend woord, maar er is een grotere verscheidenheid van letter-

reeksen mogelijk als het woord niet zinnig hoeft te zijn. Het juiste antwoord op de omschrijving van het cryptogram is een unieke reeks letters, zodat er maar één mogelijkheid is en helemaal geen verscheidenheid. De verscheidenheid, het aantal mogelijkheden, neemt een beetje toe als de enige eis is dat er een betekenisdragend woord moet ontstaan. Zij neemt sterk toe wanneer alle beperkingen vervallen en betekenisloze woorden zijn geoorloofd. Dan zijn er vierentwintig mogelijke reeksen die alle van elkaar verschillen.

Als een toestand van hoge entropie inhoudt dat er veel manieren zijn waarop de delen van het systeem kunnen worden gegroepeerd, en een van lage entropie dat er minder mogelijkheden zijn, kan de entropie zelf door een wiskundige uitdrukking worden voorgesteld, die deze mogelijkheden symboliseert en hun verscheidenheid meet. Dit was dan ook Boltzmanns benadering van de tweede wet. Zijn grondvergelijking, gegrift in zijn grafsteen in Wenen, is erg eenvoudig. Ze luidt:

$$S = k \cdot \log W$$

Waarin S staat voor entropie, k een universele constante is (bekend als de Boltzmann-constante), en W te maken heeft met het aantal manieren waarop de delen van het systeem kunnen worden gegroepeerd. De entropie S bereikt een maximum als alle delen van het systeem zo grondig en willekeurig zijn gemengd, dat er geen reden is te verwachten dat ze de voorkeur geeft aan een bepaalde groepering uit het kolossale aantal mogelijke groeperingen. Aangezien het systeem in constante beweging is, worden elk ogenblik nieuwe ordeningen in de onzichtbare microwereld gecreëerd, net zoals een pak speelkaarten elke keer dat het wordt geschud een nieuwe volgorde krijgt. Op de macroschaal van de menselijke waarneming bestaat er echter geen verscheidenheid door onze onkunde van de kleinschalige toestand van het systeem. Onze kennis van het systeem is minimaal door de immense verscheidenheid van mogelijke toestanden waarin het zou kunnen verkeren. Er is geen beginnen aan om naar zijn werkelijke toestand te raden, omdat bij maximale entropie elke groepering uit dit enorme aantal mogelijkheden even waarschijnlijk is.

Boltzmann merkte op dat hoe hoger de entropie is, des te minder informatie we kunnen hebben over de microkosmos, de samenstellende delen die de materie vormen. Dit wordt intuïtief duidelijk in het dagelijks bestaan. Als iemand naar een grote bibliotheek gaat om een exemplaar van *Oorlog en Vrede* te lenen, zal het maar een paar minuten vergen om het boek te vinden, als de bibliotheek tenminste goed op orde is en iedere gebruiker de regels eerbiedigt. Het boek zal tussen de romans staan en de naam van de auteur zal in alfabetische volgorde voorkomen. In de catalogus heeft het boek een uniek decimaal getal. Er is slechts één mogelijke manier waarop *Oorlog en Vrede* in

relatie tot alle andere boeken kan worden geordend. Er is zelfs maar één mogelijke manier waarop de inhoud van de hele bibliotheek kan worden gerangschikt. Neem echter nu eens een bibliotheek waarin de boeken naar de kleur van hun omslag zijn gerangschikt. Er kunnen wel duizend rode boeken bij elkaar op een plank staan. Deze opstelling bevat een zekere mate van orde en geeft enige informatie, maar niet zoveel als die van de eerste bibliotheek. Aangezien er niet het voorschrift van kracht is de rode boeken op titel en auteur op de plank te zetten, is het aantal mogelijkheden om de boeken daarop te rangschikken veel groter. Als de lener weet dat *Oorlog en Vrede* een rood omslag heeft, zal hij naar het juiste vak gaan, maar dan zal hij elk boek stuk voor stuk moeten bekijken totdat hij het gezochte exemplaar vindt.

Neem vervolgens een derde bibliotheek voor de geest waarin geen enkele regel meer geldt. De boeken worden lukraak op de planken gezet. *Oorlog en Vrede* kan overal in de bibliotheek staan. Er is onmiskenbaar een bepaalde volgorde maar die is 'ruis' en geen boodschap. Deze is slechts één uit een waarlijk immens aantal mogelijke manieren om de boeken te ordenen en welke dat is, valt niet te zeggen, omdat ze alle even waarschijnlijk zijn. De onwetendheid van een lezer omtrent de feitelijke indeling is groot in verhouding tot het aantal van deze mogelijke en even waarschijnlijke manieren.

In Boltzmanns vergelijking $S = k \cdot \log W$ is de S van de bibliotheek of van entropie kleiner wanneer haar W , ofwel het aantal manieren waarop de boeken kunnen worden gerangschikt, klein is. Wanneer de entropie van de bibliotheek minimaal is, dus als alle boeken in een unieke, voorgeschreven volgorde staan en alle informatie, nodig voor het vinden van een bepaald boek, in de catalogus bijeen staat, heeft S haar laagste waarde. Anderzijds is S hoog als het aantal manieren waarop de boeken kunnen worden gerangschikt groot is, dat wil zeggen als W een hoge waarde heeft.

In de bibliotheek betekent een hoge entropie gebrek aan informatie. Het betekent onzekerheid. In een thermodynamisch systeem betekent hoge entropie gebrek aan informatie over de interne structuur en verlies van het vermogen om energie voor een nuttig doel te gebruiken. Door de boeken op hun juiste plaats terug te zetten zou de entropie van de bibliotheek worden verlaagd. Dit leidt tot een voor de hand liggende, maar misleidende vraag: wat gebeurt er als de moleculen van een thermodynamisch systeem in evenwicht of maximale entropie 'teruggegroepeerd' zouden kunnen worden in de geordende toestand waarin ze zich bevonden toen het systeem nog een lage entropie had? Zou dat niet de geldigheid van de tweede hoofdwet ondermijnen die immers bepaalt dat de entropie nooit kan afnemen tenzij energie van buiten het systeem wordt gebruikt om het er weer bovenop te helpen.

Een van de beroemdste paradoxen in de natuurkunde is eraan ontleend dat een gas in een toestand van maximale entropie kan worden voorzien van een eigen 'bibliothecaris' om het weer tot de orde te roepen. Een intelligent wezen, klein en beweeglijk genoeg om in de microwereld van een vat met gas te kunnen binnendringen, zou de moleculen in snelle en langzame kunnen sorteren, net

zoals een bibliothecaris boeken sorteert. Het systeem zou dan weer arbeid kunnen verrichten. Dat een dergelijk kunststukje in de praktijk niet te realiseren is, is van geen belang. In principe is het denkbaar en zou het een manier kunnen zijn om de wet van de toenemende entropie te schenden.

Het schepsel dat tot zoiets in staat was, was een geesteskind van James Clerk Maxwell en werd Maxwells demon of het duiveltje van Maxwell genoemd. Als het duiveltje de gemengde moleculen van een gas kon ontmengen, en door het openen en sluiten van een volmaakte, wrijvingloze deur de snelle sorteren in een compartiment en de langzame in een ander, kon het bereiken wat volgens de thermodynamica onmogelijk was en een onomkeerbaar proces toch omkeren. Omwille van de redenering werd het duiveltje geacht voor het openen en sluiten van de schuifdeur geen energie te gebruiken.

Maar het is duidelijk dat het duiveltje, zelfs als het geen energie gebruikt om de deur te bedienen, toch informatie nodig heeft om de snelle moleculen van de langzame te onderscheiden. In dat geval komt een nieuwe vraag op: Is informatie op zich voldoende om de entropie van een systeem te verlagen en weer toegankelijk en bruikbaar te maken? Kan het duiveltje zijn taak louter door waarneming en ervaring uitvoeren? Het antwoord is nee, omdat het duiveltje, teneinde zich op de hoogte te stellen van de moleculen in de donkere gaskamer, een lichtbron nodig heeft. Misschien zou het een kleine zaklantaarn kunnen meenemen, maar dan ontstaat er een ernstig probleem. Door zijn lantaarn te laten branden schept het duiveltje een zekere mate van orde, een contrast tussen de hoogwaardige energie van het licht en de ontaarde energie van de ongesorteerde gasmoleculen. En de tweede hoofdwet bepaalt dat deze orde wanorde moet worden, waardoor de entropie toeneemt en het hele systeem, duiveltje inclusief, neigt naar een toestand van evenwicht.

Pas in 1922 hief Leo Szilard, een natuurkundestudent in Berlijn, deze paradox definitief op door te laten zien dat het duiveltje, alleen al door het verwerven van informatie over de moleculen, minstens evenveel entropie schept als er geëlimineerd zou worden door het sorteren van de moleculen in gescheiden compartimenten. In zijn autobiografie herinnert Szilard zich het uitdrijven van Maxwells duiveltje als een erg vruchtbare periode in zijn vroege intellectuele ontwikkeling, zo'n zes maanden nadat het hem gelukt was Einstein te verrassen met een bewijs dat weerlegde dat thermodynamische wetten van de mechanica moeten worden afgeleid, hetgeen in die tijd een algemeen aanvaard inzicht was. 'Het artikel over het duiveltje van Maxwell', aldus Szilard, 'was een radicale afwijking van het toenmalig denken omdat ik zei dat de kern is dat het duiveltje informatie gebruikt - om precies te zijn informatie waar het niet echt over kan beschikken omdat het ze raadt. Ik zei dat er een verband bestaat tussen informatie en entropie en ik berekende dat verband.' Wat Szilard in wezen aantoonde was dat niet alleen arbeid of orde moet worden betaald met het onomkeerbare verval van energie, maar ook informatie, zelfs zoiets schijnbaar simpels als een waarneming. In de bewoordingen van een in

de wetenschap vaak herhaald *bon mot* 'Een onbevleete waarneming bestaat niet'.

Entropie is een veelzijdig begrip. Ze meet een fysieke eigenschap: de overgang van energie van een toegankelijke naar een ontoegankelijke toestand. Ze heeft te maken met waarschijnlijkheid, aangezien de *meest waarschijnlijke* toestand van een systeem in voortdurende, willekeurige beweging er een is waarin al zijn tegenstellingen zijn weggenomen. Als een stuiver vaak genoeg wordt opgegooid, dan zal de kop even dikwijls boven komen als munt, de ene mogelijkheid wordt niet vaker realiteit dan de andere, maar beide zijden volgens een gelijke verdeling.

Entropie is ook een onomkeerbaar proces. Ze neemt niet af, tenzij er een extra energiebron tussenbeide komt om het systeem weer enigszins te ordenen. Op die manier is ze een fysische index voor de onomkeerbare tijdstroom die maar een richting opgaat. Een waarnemer kan vroeger onderscheiden van later door de toename van entropie te meten. Als op een foto een vaas te zien is en een tweede foto toont dezelfde vaas aan diggelen, dan is het bijna zeker dat de tweede foto later is genomen dan de eerste. Het statistische karakter van entropie beïnvloedt echter de kennis die we van het verleden en de toekomst kunnen hebben. In Newtons macroscopische kader is volmaakte informatie, zowel vooruit als achteruit in de tijd, verzekerd. Door te weten waar een voorwerp nu is, hoe snel het beweegt en in welke richting, kan een waarnemer voorspellen waar het op een bepaald ogenblik in de toekomst zal zijn. En wat meer is, we kunnen 'terugspellen' en zeggen waar het in het verleden was. In de thermodynamica, waar wetenschappers te maken hebben met waarschijnlijkheid, is dergelijke volmaakte informatie niet beschikbaar. In termen van wat een waarnemer over een systeem kan weten - bijvoorbeeld over moleculen in een gas - volgt een deeltje niet een enkel continu spoor door de ruimte maar een aantal mogelijke sporen. We kunnen voorspellen waar het deeltje op een toekomstig tijdstip waarschijnlijk zal zijn, maar het is iets anders om te zeggen waar het waarschijnlijk was op een tijdstip in het verleden. J.R. Lucas heeft erop gewezen dat, zelfs al kunnen we met een zekerheid grenzende waarschijnlijkheid voorspellen dat een twintigjarige man die veertig sigaretten per dag rookt voor zijn negentigste zal sterven, daaruit nog geenszins volgt dat een man die op zijn negentigste nog steeds leeft dus niet veertig sigaretten per dag rookte toen hij twintig was. Dit lijkt op het geval van een zandkasteel op het strand, willekeurig verwaaid door de wind. Het is heel gerechtvaardigd om te zeggen: 'Het is naar alle waarschijnlijkheid morgen geen kasteel meer, maar een zandhoop.' Aan de andere kant kunnen we redelijkerwijs, zonder voorafgaande kennis, niet verklaren: 'Naar alle waarschijnlijkheid was dit gisteren geen zandhoop, maar een zandkasteel.' Aldus ziet het er naar uit dat wanneer een systeem statistisch wordt beschreven, in plaats van in termen van het rechtstreekse oorzaak-en-gevolgpatroon, niet alleen de tijd, maar ook de

informatie onomkeerbaar in een enkele richting reist.

Entropie staat dichterbij dan de oudere natuurwetten bij de rommeligheid en de verscheidenheid van het bestaan. In zijn *Untergang des Abendlandes* koos Oswald Spengler entropie uit als het meest kenmerkende begrip voor het verval van de moderne wetenschap in haar klassieke zuiverheid en zekerheid. Hij liet zijn keus op entropie vallen omdat het meer een statistisch dan een exact begrip is en meer dan de tijdloze, abstracte vergelijkingen van de oude mechanica van doen heeft met levende dingen en geschiedenis. Spengler schreef:

De statistiek behoort, evenals de chronologie, tot het domein van het organische, van het veranderlijk leven, tot het Lot en het Toeval en niet tot de wereld van wetten en tijdloze causaliteit.[...] Zoals iedereen weet dient de statistiek bovenal ter karakterisering van politieke en economische, dus historische ontwikkelingen. In de 'klassieke' mechanica van Galilei en Newton zou voor haar geen ruimte zijn. En nu denken we de inhoud van dat terrein te begrijpen en dat zij alleen statistisch en uit het oogpunt van de waarschijnlijkheid begrijpelijk is...wat betekent dit dan? Dit betekent dat wijzelf het object van het begrijpen zijn.

De tweede hoofdwet wordt 'antropomorf' genoemd, om wat ze zegt over de grenzen die de natuur stelt aan het menselijk gebruik van energie. Spengler dacht na over de 'diepe tegenstelling tussen theorie en werkelijkheid' die met deze wet juist in de theoretische natuurkunde voor het eerst naar voren werd gebracht. Een hedendaags natuurkundige, P.W. Bridgman, heeft gezegd dat de tweede hoofdwet nog steeds riekt naar haar menselijke oorsprong. Entropie heeft altijd geprobeerd te ontsnappen uit haar fysische en mathematische bakermat en zich te laten adopteren door economen, macrohistorici en andere speculatieve denkers. Talrijke auteurs hebben haar op even zovele manieren gedefinieerd, zelden helemaal bevredigend en met iets van de vrijheid die romanschrijvers zich permitteren bij het duiden van de menselijke ervaring. William Ralph Inge, 'de droevige deken' van Saint Paul's Cathedral, nam de tweede hoofdwet op in zijn theologie. Henry Adams, geïnspireerd door een biografie van lord Kelvin, een van de grondleggers van de Engelse natuurkunde, spande haar in voor een geschiedkundige theorie. Entropie werd toegepast op Freuds stelling van de doodswens en omgesmeed tot een argument tegen het darwinisme. Dorothy L. Sayers, die een levendige interesse had in het doen en laten van de wetenschapsmensen in haar tijd, noemt de tweede hoofdwet in meer dan een van haar detectives. In *Have His Carcase* merkt lord Peter Wimsey tegen Olga Kohn op dat wat hem bevalt aan het door haar geleverde bewijsmateriaal inzake de moord op een gigolo op een verlaten Engels strand

is, dat het de laatste hand legt aan de totale en ondoordringbare duisternis rondom het probleem dat de inspecteur en ik van plan zijn op te lossen. Het reduceert het tot de hele kern van onbegrijpelijke onzin. Daarom krijgen we, volgens de tweede

hoofdwet van de thermodynamica, die bepaalt dat we van uur tot uur en moment tot moment vooruit gaan naar een toestand van steeds meer willekeur, de positieve verzekering dat we tevreden en veilig de goede kant opgaan.

In de periode na de Tweede Wereldoorlog onderging entropie weer een van haar Merlijnachtige gedaanteverwisselingen toen ze met een informatietheorie werd verbonden. Het heeft jaren gekost dit aspect van entropie, zoals andere in het verleden, te onderzoeken en het begrip heeft het ondoordringbare woud der wetenschappelijke controverse nog steeds niet verlaten. Aan een verband tussen informatie en entropie, impliciet in de eerste stapjes van de theorie, wordt vandaag de dag nog steeds door wetenschappers getwijfeld. Sommigen betwijfelen of het verband meer dan louter formeel is of tot diepere inzichten zal leiden. John Pierce, een vooraanstaande communicatietheoreticus, beweert dat de informatietheorie bij ingenieurs en wiskundigen thuishoort en dat het haar belangrijkste zorg is betere technologie te bouwen en het functioneren van communicatieapparatuur te begrijpen. Volgens hem staat dat los van de natuurkunde. 'Het is het werk van God versus dat van de mens,' aldus Pierce. 'Natuurkundigen bemoeien zich met Gods werken, ingenieurs met de werken van de mens.' Maar het is interessant op te merken dat Claude Shannon, de voornaamste schepper van de informatietheorie, daar anders over denkt. In een gesprek in de herfst van 1979 zei Shannon tegen mij:

Ik denk dat het verband tussen de informatietheorie en de thermodynamica op den duur zal standhouden, maar het is nog niet helemaal onderzocht en begrepen. Er zit meer in dan we nu weten. Wetenschapsmensen onderzoeken het atoom nu zo'n honderd jaar en ze vinden steeds meer diepte, steeds meer kennis. Misschien gaat hetzelfde gelden voor de relatie waar wij het nu over hebben.

4. EEN BROEINEST VAN SUBTILITEITEN EN VALLEN

Informatie is een verfijndere combinatie van het theoretische en het stoffelijke dan men op het eerste gezicht zou veronderstellen. Dit heeft te maken met het verband tussen orde en de staat van iemands kennis, met het dubbelzinnige karakter van waarschijnlijkheid en met het feit dat orde en waarschijnlijkheid zowel in de thermodynamica als in de informatietheorie met elkaar zijn verbonden.

Ondanks haar indrukwekkende prestaties rust de waarschijnlijkheidstheorie zelfs vandaag nog op een wankel fundament. In de praktijk is ze een machtige theorie gebleken, maar in filosofisch opzicht staat ze nog steeds zwak. Een artikel in *The Encyclopedia of Philosophy* over dit onderwerp lijkt op een waarschuwing aan de consument op het etiket van een onveilig product: 'De lezer zij gewaarschuwd dat de waarschijnlijkheidsfilosofie hoogst controversieel is en dat de gezichtspunten zoals in dit artikel weergegeven door vele deskundige theoretici worden verworpen.'

Boltzmanns verdediging van het entropieprincipe, waardoor hij de tweede hoofdwet tot een nieuw algemeen niveau verhief, was gebaseerd op een belangrijk waarschijnlijkheidsprincipe dat 'de wet van de grote getallen' wordt genoemd. Deze wet was ontwikkeld door Jakob Bernoulli, een Zwitser die oorspronkelijk voor een kerkelijke loopbaan was opgeleid maar door zijn belangstelling voor de wiskunde naar een wereldlijk bestaan van onderwijs, reizen en geleerdheid werd gedreven. Toen Bernoulli in 1705 stierf, liet hij zijn neef Niclaus het bijna voltooide manuscript na van een boek dat uiteindelijk in 1713 verscheen. De titel luidde *Ars Conjectandi* ('De kunst van het gissen'). Een deel van het boek was gewijd aan de wet van de grote getallen, uitgedrukt in een vorm die Bernoulli zijn 'gouden theorema' noemde. De hedendaagse wiskunde-auteur James Newman noemt het 'een broeinest van subtiliteiten en vallen'.

Grofweg omschreven laat het gouden theorema zien dat waarschijnlijkheden de zekerheid op den duur steeds dichter naderen. Maar het theorema is eigenlijk nog veel sluwer. Als een perfect uitgebalanceerd muntstuk eenmaal wordt opgeworpen, mag men aannemen dat de kans op kop net als die op munt één op twee bedraagt. Als het muntstuk echter tienmaal wordt opgeworpen is er geen enkele garantie dat het resultaat vijfmaal kop en vijfmaal munt zal zijn. Omdat de ene worp niets te maken heeft met de andere uit de serie worpen is het altijd mogelijk tien achtereenvolgende keren kop óf munt te krijgen, tot verdriet van degene die op een 'normale' reeks had gegokt. Als het aantal worpen toeneemt, is het waarschijnlijk dat het percentage kop weinig

zal verschillen van het percentage munt. Hoe vaker het muntstuk wordt opgeworpen, des te kleiner dat kleine verschil in percentage waarschijnlijk wordt. Dat lijkt een geruststelling, maar dat is het in werkelijkheid niet. Merk op dat het woord 'waarschijnlijk' hiervoor in twee verschillende contexten is gebruikt en dat het theorema alleen een hoe langer hoe gelijker percentage kop en munt belooft, niet een absolute gelijkheid.

Toegepast op een thermodynamisch systeem stelt het gouden theorema dat het bij het willekeurige bewegen en botsen van moleculen het waarschijnlijkst is dat de verschillen - of het nu om de contrasten van het systeem gaat of om de asymmetrie tussen snelle en langzame moleculen - zullen worden geëffend. Hoe langer het moleculaire gebots duurt, des te kleiner wordt waarschijnlijk de asymmetrie. En minder asymmetrie betekent hogere entropie.

Aldus voorspelt het gouden theorema de onomkeerbaarheid, de eenrichtingstransformatie van materie waardoor haar entropie niet afneemt. De wetten van Newton staan individuele deeltjes toe om de weg die zij door de ruimte hebben afgelegd precies in omgekeerde richting te volgen en op het oorspronkelijke uitgangspunt terug te keren. Maar dat in een systeem met zeer veel elementen al die elementen opeens loyaal op hun schreden zouden weerkeren, acht de wet van de grote getallen boven de grenzen van waarschijnlijkheid verheven. Net zoals bij het opgooien van een muntstuk een gelijk percentage kop en munt met het verstrijken van de tijd steeds waarschijnlijker wordt, wordt in een thermodynamisch systeem als een gas de gelijke verdeling van moleculen steeds waarschijnlijker. Maar die waarschijnlijkheid gaat slechts in één richting.

Onomkeerbaarheid wordt niet door onverbiddelijke noodzaak afgedwongen. We kunnen ons best voorstellen dat alle moleculen hun weg in omgekeerde richting afleggen zonder de grondbeginselen van de mechanica geweld aan te doen. En we kunnen ons misschien ook nog een volmaakt uitgebalancheerde stuiver voor de geest roepen die een miljard keer wordt opgeworpen en toch telkens kop laat zien. Maar hoewel dergelijke voorvallen in gedachtenexperimenten mogelijk zijn, zijn zij in werkelijkheid zo onwaarschijnlijk, dat we ze met een gerust hart kunnen verwaarlozen. Onomkeerbaarheid is eerder een feit dan een wet, met dien verstande dat ze in de praktijk goed werkt maar theoretisch kwetsbaar is.

In de thermodynamica ging het zoeken naar zekerheid echter door, in de hoop alle sporen van onzekerheid uit te bannen. Wetenschappers dachten dat, als ze op de een of andere vernuftige manier de gang van elk afzonderlijk deeltje in een gasmonster zouden kunnen volgen, ze alles wat er maar over dat gas te weten valt zouden weten, rechtstreeks en volledig en zonder van de 'subtiliteiten en vallen' van de wet van de grote getallen afhankelijk te zijn. Later werd duidelijk dat zo'n onderneming tot mislukking is gedoemd, en om heel interessante redenen. Zelfs als het met bijvoorbeeld een supercomputer mogelijk zou zijn het gedrag van elk afzonderlijk deeltje bij te houden, dan zou de door de computer verstrekte informatie ons nog niet vertellen wat we moeten weten. Onder de significante eigenschappen van een gas vallen zijn

temperatuur, druk en entropie. Maar dat zijn allemaal macroscopische, statistische eigenschappen van enorme aantallen moleculen. Het heeft geen zin deze als de eigenschappen van een afzonderlijk deeltje op te vatten. De immense hoeveelheid gegevens van de supercomputer zou nog steeds als gemiddelde moeten worden genomen om de macroscopische eigenschappen te verkrijgen die voor de wet van de grote getallen belangrijk zijn.

De oorsprong van de waarschijnlijkheidstheorie is raadselachtig en vol met ten dele beantwoorde vragen. Waarom kwam de theorie zo laat op gang in de hoofdstroom van de wiskunde? Waarom vertrouwden gokkers eeuwenlang op gissing en bijgeloof, terwijl de wetenschap hun de middelen ter beschikking had kunnen stellen om een formele kanstheorie op te stellen en puur geluk een rationele basis te geven?

Tot de renaissance gebeurde er niets noemenswaardigs op dit terrein. De eerste figuur van werkelijk belang voor de geschiedenis van de waarschijnlijkheidstheorie, de Italiaan Gerolamo Cardano, verschijnt pas in de zeventiende eeuw. Cardano was arts, algebraïst, astroloog, handlijnkundige en hij bestudeerde occulte dromen - niet precies het type om een waardig stempel te drukken op de jonge loot aan de boom der wiskunde. Veertig jaar lang gokte hij stevig en soms met rampzalige gevolgen; hij had een scherp oog voor valsspelers en hun trucs. Daarbij had Cardano de kijk van de wiskundige op de regelmaat die onder toeval en geluk schuilt. Hij zag in dat onzekerheid een structuur bezit en dat, als men eenmaal de sleutel van die structuur te pakken heeft, kans niet langer tovenarij is, maar verstandelijk te beredeneren.

Cardano's eigen lot in zijn dagelijks bestaan en in het kaartspel was zo nu en dan afschuwelijk. Op het dieptepunt van zijn loopbaan woonde hij in een armenhuis in Milaan; op het hoogtepunt doceerde hij meetkunde aan de universiteit van Pavia. Tien jaar lang was hij een beroemd en geacht man, maar hij verloor zijn universitaire positie toen hij in een schandaal verwickeld raakte: zijn oudste zoon werd wegens het vergiftigen van diens vrouw terechtgesteld. Cardano kon zich aan een bot mes snijden: in Venetië viel hij in een kanaal en in Bologna werd hij uit een hardrijdende koets gesmeten. Hij overleefde vallend metselwerk en een aanval van dolle honden. Als verslaafd gokker had hij perioden van verbijsterend geluk en verachtte hij zichzelf dat hij zich inliet met dergelijke laag-bij-de-grondse activiteiten, die hij met 'architectuur, rechtszaken en weelde' typeerde als bezigheden geschikt om een mens bankroet te maken. Toch hield zelfs een nare ondeugd als het gokken zich aan bepaalde theoretische beginselen en dat verklaarde haar aantrekkingskracht op een wiskundige van Cardano's kaliber. Zijn resultaten in de algebra wogen niettemin veel zwaarder dan zijn verrichtingen aan de speeltafel. Een deel van zijn werk was zonder twijfel oorspronkelijk. Zo lijfde hij als eerste de negatieve getallen bij de wiskunde in.

Cardano formuleerde enkele kanswetten zoals hij die zag in zijn verhandeling *Liber De Ludo Aleae*, het 'Handboek van de Kansspellen'. Het boek, dat rond 1526 werd geschreven en pas anderhalve eeuw later gepubliceerd, behandelt vragen die later in de geschiedenis van de waarschijnlijkheid van aanzienlijk belang bleken te zijn. Verbazend genoeg had Cardano begrip van enige grondregels, zoals de kansverdeling en de wet van de grote getallen, die eerst honderdvijftig jaar later behoorlijk onderbouwd zouden worden. Hij wist hoe waarschijnlijkheden bij elkaar moeten worden opgeteld en hij kon berekenen hoe groot de kans is om bepaalde kaarten te trekken in het spel 'primero', een voorouderlijke versie van het pokerspelspel die tijdens de renaissance in Europa zeer in de mode was. Terugblikkend lijkt het misschien dat Cardano's ontdekkingen onbeduidend zijn en door bijna elke wiskundige met belangstelling voor gokken gedaan hadden kunnen worden. In werkelijkheid waren zij echter nieuwe en originele inzichten die nog jarenlang, terwijl de waarschijnlijkheidstheorie langzaam maar zeker haar opmerkelijk onwillige vooruitgang boekte, werden genegeerd. Deze verwaarlozing is een groot raadsel in de geschiedenis van de westerse wetenschap.

Kansspelen stelden de problemen aan de orde die wiskundigen ertoe brachten serieus over waarschijnlijkheid te gaan nadenken. Tot in de twintigste eeuw waren veel theoretici spelers in uiteenlopende stadia van verslaving. Émile Borel was een beoefenaar van het contractbridge, John von Neumann, de grondlegger van de speltheorie, was een pokerspeler. Claude Shannon is een liefhebber van effectenspeculatie. Lord Keynes, een belangrijk vernieuwer op dit terrein, wist goed zijn weg in de Europese casino's. In een opwelling nam hij eens met drie vrienden de nachtboot naar Oostende nadat hij had gehoord dat daar roulette zonder nul werd gespeeld.

Men zou kunnen zeggen dat de ontwikkeling van de moderne waarschijnlijkheidstheorie in het midden van de zeventiende eeuw een aanvang nam, toen een oud probleem bij het dobbelspel aan een strikt wiskundige behandeling werd onderworpen, wat tot een resultaat leidde dat niet strookte met de gangbare lekenopvatting van die tijd. Niet voor het eerst bleek een theorie haaks op de intuïtie te staan. In 1654 vond het beroemde voorval plaats van Chevalier de Méré, een Franse edelman aan het hof van Lodewijk XIV, die bij Pascal kwam met een vraag over gokken: Is het gunstig voor een speelhuis om te wedden dat een speler ten minste één dubbele zes in vierentwintig worpen met de dobbelsteen gooit? Naar eerbare gokkerstraditie kon het huis een dergelijke weddenschap met elke speler riskeren. De Méré vermoedde echter dat deze oude regel, die op gezond verstand was gebaseerd, niet deugde. Pascal bewees dat vierentwintig worpen eigenlijk een soort waterscheiding vormen. Op of onder dat aantal zijn de kansen lichtelijk tegen een dubbele zes gekeerd; daarboven worden ze gunstiger.

Opnieuw rijst de vraag: Waarom liet zo'n elementaire ontdekking zo lang op zich wachten, terwijl er al zesduizend jaar werd gegokt? In ieder geval loste Pascal het probleem van de edelman op. Het enige dat moest gebeuren was het samenvoegen van een paar voldoende bewezen opvattingen. Denkers waren zich al lang bewust van de onzekerheid die aan de wereld eigen is. De Jaina-filosofie uit het oude India was gebaseerd op het indeterminisme en een scala van mogelijkheden. Een aantal van haar stellingen heeft een verbazingwekkend vertrouwde klank in moderne oren. De zeven categorieën van jainaanse logica zijn:

Misschien bestaat het.

Misschien bestaat het niet.

Misschien bestaat het, bestaat het niet.

Misschien is het onbepaald.

Misschien bestaat het en is het ook onbepaald.

Misschien bestaat het niet en is het ook onbepaald.

Misschien bestaat het en bestaat het niet en is het ook onbepaald.

De hedendaagse wiskundige Leonid Maistrov ziet in de vijfde categorie, 'misschien bestaat het en is het ook onbepaald', een zijn tijd ver vooruit zijnde voorloper van het moderne begrip waarschijnlijkheidsgebied. De jainaanse logica neemt aan dat de complexiteit van de wereld onbegrensd is en dat delen daarvan altijd veranderen. Niets van wat we er op een gegeven moment van kunnen zeggen is helemaal waar. Evenals Shannons informatietheorie beschouwt de jainaanse logica fouten als intrinsiek en fundamenteel.

Een van de aantrekkelijkste verklaringen voor het geheimzinnige uitblijven van volledig ontwikkelde waarschijnlijkheidswetten in de westerse wetenschap wordt gegeven door de filosoof Ian Hacking, die aanvoert dat niemand aan een formele aanpak van de waarschijnlijkheid kon beginnen voordat haar tweeledigheid - haar subjectief-objectieve en haar innerlijke-outerlijke eigenschappen - duidelijk werd onderkend. Hacking gelooft dat de moderne waarschijnlijkheidstheorie ontstond uit de 'lage wetenschappen' van de renaissance: alchemie, geologie, astrologie en geneeskunde. Eerst in deze wetenschappen werden de noodzakelijke ideeën geboren doordat de vertegenwoordigers van die lage wetenschappen ter vergaring van de informatie waarop zij hun nieuwe kennis van de wereld baseerden hun toevlucht namen tot wat het 'testimonium van de natuur' werd genoemd. Deze getuigenis werd niet gezocht in de zogenaamde externe evidentie, aangedragen door deskundigen en in boeken beschreven, maar in de vormen van de natuur zelf. In de middeleeuwse maatschappij gold een door weldenkende mensen goedgekeurde en aanvaarde mening als een externe autoriteit. Boeken waren de voornaamste bronnen van dit gezag. In de vroege renaissance werd het gedrukte woord met overdreven eerbied behandeld en beschouwd als een fontein van waarheid. Maar tijdens de renaissance ontstond een nieuwe benadering van kennis die

afstand nam van het buitensporige vertrouwen in schriftelijk gezag en zich in plaats daarvan richtte op de ongeschreven interne evidentie van de natuur. Het begrip interne evidentie betekende een breuk met de traditie en dook vooral in de lage wetenschappen op.

De voorvechters van de interne evidentie rebelleerden tegen de boeken-wurmendoctrine van de 'goedgekeurde opinie'. De zestiende-eeuwse astroloog, alchemist, magiër en genezer Paracelsus, een overgangsfiguur op weg van de lage naar de hogere wetenschappen, koos als lijfspreuk: 'De patiënten zijn het leerboek, het ziekbed is de studeerkamer.' Hij pakte het beroemdste boek van de middeleeuwse geneeskunde, de *Canon* van Avicenna, en gooide dat in het vuur om het te vervangen door het boek van de natuur ofte wel de 'signaturenleer'. Volgens deze leerstelling kan informatie over de natuur in de natuur zelf worden gevonden, maar alleen als ze op de juiste manier wordt gelezen. De ouderdom van een hert kunnen we te weten komen door naar het aantal uiteinden van zijn gewei te kijken. Sommige planten beschikken over verjongende kracht omdat zij bloeien in de winter, het jaargetijde dat als metafoor voor de oude dag dient. Het handschrift openbaart het karakter van de schrijver; de lijnen en plooiën in zijn hand doen dat ook. De signaturenleer leidde tot de homeopatische geneeskunst, waarin ziekteverschijnselen door het opwekken van soortgelijke verschijnselen worden bestreden. Vergif in grote doses veroorzaakt ziekte, maar in heel kleine hoeveelheden toegediend kan het genezing betekenen. In sommige gevallen waren er destijds onvermoede maar reële, wetenschappelijke redenen voor deze analogieën en metaforen. In de achttiende eeuw dacht men dat wilgebast goed was bij koorts omdat wilgen van vocht houden en vocht de oorzaak kan zijn van verkoudheid en koorts. Later ontdekte men dat wilgen chemische stoffen, salicylaten genaamd, bevatten waarop aspirine (acetosalicylzuur) is gebaseerd.

Ian Hacking betoogt dat deze nieuwe aan kenmerken ontleende getuigenis een autoriteit vormde die moest worden gelezen zoals de autoriteit van boeken diende te worden gelezen. Maar terwijl het geschreven woord geacht werd onfeilbaar te zijn, was de inwendige getuigenis van de natuur niet onfeilbaar, hoewel deze meestal kon worden vertrouwd. Ze was eerder waarschijnlijk dan zeker. En het was de opkomst van deze afwijkende manier van bewijsvoering, de interne evidentie, welke vaak juist was maar er soms naast zat, die in het midden van de zeventiende eeuw de geestelijke voorwaarden schiep voor de late komst van de waarschijnlijkheidstheorie met haar tweeledige geaardheid.

Een van de twee gezichten van de waarschijnlijkheidstheorie was naar de getuigenissen gewend. Het andere keek naar de frequentie van gebeurtenissen, naar vaste regelmaat, statistieken. Zo werden dank zij de lage wetenschappen in het begrip interne evidentie de twee soorten waarschijnlijkheid, de subjectieve en de objectieve, samengevoegd. Als Hackings stelling wordt aanvaard, is de opkomst van de waarschijnlijkheidstheorie om een goede reden vertraagd. Tot de renaissance lagen alle benodigde denkbeelden nog *niet* op hun juiste plaats.

In de daaropvolgende jaren werden veel pogingen ondernomen deze twee aspecten van waarschijnlijkheid te scheiden en het begrip uitsluitend objectief - 'daarbuiten in de wereld' - of uitsluitend subjectief - 'hierbinnen in de geest' - te maken. In het verdere verloop van de geschiedenis van de waarschijnlijkheidstheorie weerspiegelen haar zwalkende koers tussen aanzien en kwade reuk, haar trage start en perioden van stilstand veelvuldig het dilemma waarvoor de theoretici zich geplaatst zagen als zij trachtten de tweeledigheid der waarschijnlijkheid - haar janusgezicht - te doorgronden.

Zoals we hebben gezien berust het theorema van Bernoulli op de acceptatie dat een muntstuk even waarschijnlijk kop als munt oplevert. Maar dat is een hoogst wankele gedachte. Is bij elke worp kop werkelijk even waarschijnlijk als munt? Of denken we dat alleen maar? Als het antwoord op de eerste vraag 'ja' luidt, is de gelijke waarschijnlijkheid objectief en extern, onafhankelijk van de geest. Maar als het antwoord voortkomt uit het feit dat we denken dat er geen reden is waarom kop niet even vaak als munt zou voorkomen, is de gelijke waarschijnlijkheid intern en abstract.

De objectivistische kijk op waarschijnlijkheid beklemtoont het stoffelijke karakter van toevalsgebeurtenissen, hun onpersoonlijke en openbare aard. Door een muntstuk lang genoeg op te gooien en de frequentie van kop ten opzichte van munt te noteren, worden de waarschijnlijkheden van kop en munt extern en bijna een fysische eigenschap van het muntstuk. Het resultaat van al deze herhaalde proefnemingen is een op zichzelf staande verzameling statistisch materiaal, los van de kennis van de waarnemer, die het mogelijk maakt de waarschijnlijkheid van de volgende proefnemingen te voorspellen.

Tijdens de negentiende eeuw kwam deze relatieve frequentie-interpretatie te voorschijn als een alternatief voor de klassieke theorie die waarschijnlijkheden niet in die mate had gerationaliseerd en daarom dubbelzinniger leek. Deze recentere benadering van waarschijnlijkheid kwam in de twintigste eeuw tot volle bloei door het werk van Richard von Mises, die Hitler-Duitsland had verlaten en aërodynamica en toegepaste wiskunde aan de Harvard-universiteit doceerde. Von Mises nam zonder meer aan dat waarschijnlijkheden slechts ontstaan als het resultaat van ervaring en van experimenteren. De waarschijnlijkheid om met twee dobbelstenen een dubbele zes te gooien valt niet te bepalen zolang er niet herhaaldelijk met de dobbelstenen is gegooid. Men kan niet spreken van de waarschijnlijkheid van een op zichzelf staande gebeurtenis. Er moeten vele gebeurtenissen zijn. Het experiment moet net zo lang doorgaan totdat er voldoende reden is om te geloven dat de relatieve frequentie - bijvoorbeeld het percentage kop - een vaste limiet bereikt als het experiment voor onbepaalde tijd zou worden voortgezet. De waarde van deze limiet is de waarschijnlijkheid.

Het zwakke punt in von Mises benadering is dat een oneindige reeks proefnemingen in de praktijk onmogelijk is en dat hij niet aangeeft hoe lang een reeks zou moeten zijn. Er bestaat een onderscheid tussen de abstracte, wiskundige theorie en haar concrete gebruik in werkelijke omstandigheden. En door

te zeggen dat de reeks doorgaat totdat er goede redenen zijn om te veronderstellen dat ze bij een oneindig aantal proefnemingen een bepaalde grenswaarde zal bereiken, liet von Mises de subjectiviteit via de achterdeur heimelijk weer binnen.

De interpretatie van von Mises heeft betrekking op gebeurtenissen die oneindig kunnen worden herhaald. Maar hoe staat het met gebeurtenissen die slechts een paar keer kunnen worden waargenomen? Hoe groot is de waarschijnlijkheid dat een bepaalde man en een bepaalde vrouw in hun huwelijk zullen slagen? Zal de eerste roman van een nieuwe auteur een bestseller zijn? Dit zijn vragen waarvan de waarschijnlijkheid niet door herhaalde proefneming kan worden vastgesteld. Zij lijken een subjectieve interpretatie van waarschijnlijkheid te vereisen waarin niet genoeg bewijsmateriaal voor bijna-zekerheid is, maar voldoende om tot een redelijke slotsom te komen. De Engelse wiskundige I. J. Good heeft een dergelijke subjectieve waarschijnlijkheid omschreven als 'een mate van overtuiging die behoort tot een geheel van overtuigingen waaruit de ergste tegenstrijdigheden door middel van onafhankelijke oordelen zijn verwijderd'.

Een voorbeeld van subjectieve interpretatie is te vinden in het werk van lord Keynes, wiens *A Treatise on Probability* in 1911 werd geschreven, maar pas in 1921 gepubliceerd. Lord Keynes deed voor de waarschijnlijkheidstheorie wat Bertrand Russell en Alfred North Whitehead in *Principia Mathematica* voor de wiskunde hadden proberen te doen, namelijk haar logisch uit een klein aantal basispremissen afleiden. Keynes was van mening dat elke bewering een zekere waarschijnlijkheid heeft en dat deze waarschijnlijkheid wordt voorgesteld door de mate van geloof die een rationeel persoon met gebruikmaking van al het beschikbare bewijsmateriaal aan de bewering hecht. Volgens deze opvatting bestaat er geen wezenlijk onderscheid tussen waarschijnlijkheid en geloofwaardigheid. Een gegeven hoeveelheid bewijs resulteert in een zeker vertrouwen in een uitspraak en tussen bewijs en uitspraak bestaat een logisch verband dat de waarschijnlijkheidsrelatie wordt genoemd. Hoewel de methode van lord Keynes algemener is dan die van von Mises, is deze eveneens onbevredigend omdat 'rationeel geloof' een niet zo eenvoudig te meten grootheid is.

In de laatste jaren is een andere benadering van de waarschijnlijkheid naar voren gekomen die het filosofische drijfzand, waarin pure subjectivisten en objectivisten zo vaak terecht zijn gekomen, grotendeels vermijdt. Deze recentere interpretatie gaat uit van de vooronderstelling dat een theorie van waarschijnlijkheid eenvoudigweg een methode is om gedeeltelijke kennis te coderen. Met andere woorden, ze codeert 'ontbrekende informatie'.

In deze zienswijze is waarschijnlijkheid, een van de wortels van de informatietheorie, onlosmakelijk verweven met de hoeveelheid en het soort kennis welke we hebben van een bepaalde gebeurtenis of een reeks van gebeurtenis-

sen waarvan de uitkomst onzeker is. Ernstige problemen ontstaan als wetenschappers het waarschijnlijkheidsbegrip trachten te scheiden van het informatiebegrip, omdat het eerste niet kan worden gedefinieerd zonder de hulp van het tweede. In Shannons theorie is entropie een waarschijnlijkheidsverdeling die verschillende waarschijnlijkheden toekent aan een verzameling mogelijke boodschappen. Maar entropie is eveneens een maat voor wat de ontvanger *niet* van de boodschap weet als deze arriveert. Entropie is een graadmeter van zijn onzekerheid van wat hij kan verwachten. Als de entropie maximaal is, dat wil zeggen als alle mogelijke boodschappen even waarschijnlijk zijn, is zijn onwetendheid ook maximaal. De ontvanger kent de hele scala van mogelijke boodschappen zoals de roulettespeler het aantal mogelijke uitkomsten van een draai aan de schijf kent omdat hij beschikt over een zekere hoeveelheid voorinformatie betreffende de algemene eigenschappen van het boodschappenstelsel zelf: zijn alfabet van symbolen, het woordenboek, de grammaticale regels om die op verschillende manieren te combineren. Dergelijke kennis betekent dat bepaalde rangschikkingen van symbolen en woorden waarschijnlijker zijn dan andere.

Veronderstel dat de 'boodschappenbron' een hoogleraar is die een lezing houdt over economie en dat de ontvanger van de professorale boodschappen drie studenten zijn. De eerste is een Japanner die de hoogleraar niet kan verstaan. Zijn onzekerheid is maximaal. Voor hem zijn alle boodschappen even onvoorspelbaar; geen enkele heeft betekenis. Ze zijn niet van ruis te onderscheiden. De tweede student verstaat de hoogleraar weliswaar, maar weet niets van economie. In zijn geval zal niet elk woord een volslagen verrassing zijn. Door de structuur van de taal komen bepaalde woorden en woordenreeksen met een grotere waarschijnlijkheid voor dan andere. De derde student, die niet alleen de taal van de hoogleraar verstaat maar bovendien een gedegen kennis van economie heeft, ervaart nog minder onzekerheid. In veel gevallen kan hij raden welke zinsdelen of zelfs hele zinnen de hoogleraar zal gaan zeggen op grond van wat deze zojuist te berde heeft gebracht. De reeds aanwezige kennis van deze derde student maakt de boodschappen voor hem waarschijnlijker en minder verrassend.

Aangezien het hele doel van communicatie het verzenden is van boodschappen die niet helemaal voorspelbaar zijn, moet communicatie bepaalde eigenschappen gemeen hebben met elk proces waarvan de uitkomst onzeker is, of dat nu een rouletteschijf is, een verkiezing of een harddraverij. We weten genoeg om in staat te zijn waarschijnlijkheden aan mogelijke uitkomsten toe te kennen en deze waarschijnlijkheden dienen alles wat we vooraf van de werkelijke uitkomst weten te weerspiegelen. De kans bij het wedden op een paard in de draverij wordt bepaald door informatie van bookmakers, hoe onvolledig die ook mag zijn. Myron Tribus van het MIT stelt het aldus:

Elke waarschijnlijkheidstheorie heeft betrekking op het opnemen van informatie en het op zodanige wijze coderen daarvan, dat we in staat zijn naar die informatie te

handelen zonder dat we meer hoeven te veronderstellen dan we weten en terwijl we erin slagen te gebruiken wat we wel weten. Ze geeft ons de mogelijkheid om toch over zaken te kunnen praten waarover we niet alle informatie hebben.

Waarschijnlijkheid is in essentie het toekennen van een numerieke waarde aan elke mogelijke gebeurtenis, een getal dat kennis vertegenwoordigt. Deze kennis kan echter van mens tot mens verschillen. We bedenken bepaalde situaties waarin iedereen dezelfde informatie heeft, afkomstig van kaarten, dobbelstenen of muntstukken. De fout schuilt in de poging alle onzekere processen tot deze categorie terug te voeren. Het is de taak van een waarschijnlijkheidstheorie een manier te vinden om verschillende soorten kennis te coderen en daaraan op de juiste wijze waarschijnlijkheden toe te kennen. En dat is eveneens de taak van een informatietheorie. Als degene tot wie ik spreek bijvoorbeeld veel van natuurwetenschappen weet, kan ik hem gemakkelijk feiten vertellen. Ik hoef minder woorden te gebruiken dan bij iemand die heel weinig weet. Als ik meer weet dan u, is mijn code niet dezelfde als de uwe.

Het vruchteloze debat over subjectieve versus objectieve interpretaties van waarschijnlijkheid is volgens Tribus 'een valstrik en een zinsbegoocheling', dat is achterhaald door de notie van de nauwe relatie tussen waarschijnlijkheid en informatie. Dit begrip is grotendeels voortgekomen uit het werk van Shannon, hoewel Shannon zelf voor een relatieve frequentiebenadering koos.

Elke toekenning van waarschijnlijkheden moet de zekerheid van de waarnemer reflecteren en 'uiterst vaag' zijn over deze onzekerheid. Maar zij moet ook alle recht doen aan de kennis die al in de geest van de waarnemer aanwezig is. Tribus gaf me een mooi voorbeeld van een zodanig gecodeerde boodschap dat hij de volledige informatie-inhoud kon voorspellen op grond van reeds aanwezige kennis, die bij een andere lezer van dezelfde boodschap ontbrak. Op zekere dag ontving Tribus telefonisch een telegram van zijn dochter die door Europa reisde. De tekst van het telegram, dat vanuit Parijs was verstuurd, luidde:

PLEASE SEND ME FIFTY DOLLARS AMERICAN EXPRESS
NICE LETTER OF EXPLANATION FOLLOWS LOVE LOU.

Voor Tribus' echtgenote leverde deze boodschap geen probleem op, al leek het woordje 'nice' wat vreemd en onwaarschijnlijk. Maar voor Tribus zelf klopte er iets niet. Hij wist dat er drie kantoren van American Express in Parijs zijn en het telegram had moeten aangeven welk werd bedoeld. Het had meer informatie moeten bevatten. Toen realiseerde hij zich dat met 'nice' niet het bijvoeglijk naamwoord 'leuk' ter omschrijving van de verwachte brief werd bedoeld, maar de gelijknamige stad aan de Franse Rivièra. De code van de boodschap was niet de juiste voor iemand die niet wist dat er drie American-Expresskantoren in Parijs zijn. Ze stelde de betrokkene niet in staat op grond van waarschijnlijkheid te voorspellen dat 'nice' in werkelijkheid 'Nice' moest

zijn. Voor Tribus bevatte de boodschap in code niet meer of minder dan hij al wist. Vanwege zijn voorkennis was 'Nice' in de context van het bericht waarschijnlijker dan 'nice'.

Waarschijnlijkheid meet dus, net zoals Shannons entropie, zowel kennis als onwetendheid. Om deze reden gelooft de fysicus Edwin Jaynes dat we op de drempel staan van een geheel nieuwe benadering van de interpretatie van waarschijnlijkheid, entropie en informatie, die algemener zal zijn dan alles wat eraan voorafging. Jaynes gelooft ook dat het een historisch toeval was dat de thermodynamica in het menselijk denken zo lang verbonden bleef met de materie en stoffelijke deeltjes die de wetten van de mechanica gehoorzamen. Hoewel Boltzmann de tweede hoofdwet van de thermodynamica in termen van zuivere waarschijnlijkheid verklaarde, werd dit feit bijna honderd jaar lang niet volledig onderkend. Tegenwoordig wordt het entropieprincipe beschouwd als een speciaal geval van een meer algemene methode van redeneren die in het geheel niet afhankelijk is van de wetten van de natuurkunde of mechanica.

Evenzo was het een historisch toeval dat informatie met thermodynamica werd verbonden. Jaynes denkt dat deze band eens zal worden verbroken. De begrippen informatie en entropie zullen convergeren en tot een bredere, allesomvattende theorie leiden. Zij zullen zich als niet meer dan speciale gevallen onthullen van de ruimere concepten waarover Jakob Bernoulli in de achttiende eeuw schreef. Jaynes gelooft dat

we tot het inzicht zullen komen dat Bernoulli's boek *Ars Conjectandi* ('De kunst van het gissen') exact de juiste titel draagt, omdat gissen precies is wat we doen, welke elegante benamingen, als 'taxaties' of 'significantietoetsen', we er ook aan geven. We gissen op grond van wat we wel en niet weten, van informatie waarover we al dan niet beschikken. En deze interpretatie zal het onderwerp een stuk begrijpelijker voor de leek maken omdat dit de manier is waarop hij waarschijnlijkheid altijd al heeft benaderd.

5. NIET TE SAAI, NIET TE SPANNEND

Tijdens de Tweede Wereldoorlog had Shannon gewerkt aan geheime codes en dat kwam hem goed van pas bij het verhelderen van zijn ideeën over een nieuwe informatietheorie. Deze ervaring deed hem vooral nieuwe benaderingen aan de hand van het vraagstuk hoe in een communicatiesysteem boodschappen van ruis of orde van wanorde moeten worden gescheiden.

Dit is een veel interessanter en omvangrijker onderwerp dan op het eerste gezicht lijkt omdat communicatie niet alleen aan radio's, telefoons en televisiekanalen is voorbehouden. In de natuur en overal waar leven is vindt communicatie plaats. De genen vormen een systeem voor het verzenden van chemische boodschappen naar de eiwitfabrieken in de cellen die ze opdracht geven een levend organisme te bouwen. Het meest complexe communicatienetwerk op aarde is de mens en zijn taal is een code die de ordelijke structuur van gesproken boodschappen zo ingenieus bewaart, dat de manier waarop dit gebeurt nog steeds niet helemaal is doorgrond. Het probleem is zo algemeen dat de vraag hoe boodschap en ruis in de informatietheorie uit elkaar worden gehouden equivalent is met de vraag die in verband met de tweede hoofdwet opkwam: 'Waarom is de wereld vol met de meest onwaarschijnlijke soorten van orde, als de meest waarschijnlijke toestand waarin het universum kan verkeren er een van absolute chaos is?'

Berichten zijn ondergedompeld in ruis omdat ruis wanorde is en het een axioma van de klassieke thermodynamica is dat wanorde gemakkelijker te bereiken en duurzamer is dan orde, die moeizaam en tijdelijk tot stand komt. Ruis is altijd geneigd zich bij boodschappen te voegen en deze te verstrooien, te verminken en minder betrouwbaar te maken. Er moest een manier worden gevonden - en het is zonneklaar dat de natuur daarin is geslaagd - om deze neiging te weerstaan of tenminste in te perken, zodat de volgorde van de symbolen afkomstig van de berichtenbron haar bestemming in min of meer oorspronkelijke vorm bereikt.

In bijna alle vormen van communicatie worden meer berichten verzonden dan strikt genomen noodzakelijk is voor het transport van de door de afzender bedoelde informatie. Zulke bijkomende boodschappen verminderen het onverwachte, het verrassingseffect van de informatie en maken deze voorspelbaarder. Deze extra portie voorspelbaarheid wordt redundantie genoemd en is een van de belangrijkste begrippen van de informatietheorie. Redundantie is in wezen een beperking. Ze beperkt de waarde van W in de entropievergelijking $S = k \cdot \log W$ en vermindert het aantal manieren waarop de verschillende delen van een systeem worden gegroepeerd.

Een boodschap draagt geen informatie over als er in de geest van de ontvanger niet enige onzekerheid over de inhoud van de boodschap bestaat. Hoe groter deze onzekerheid is, des te groter is de hoeveelheid informatie als die

onzekerheid wordt weggenomen. Hierin schuilt de diepgaande relatie tussen informatie en waarschijnlijkheid. Als een rouletteschijf gaat draaien, wordt onzekerheid gecreëerd die aanhoudt tot het ogenblik waarop het balletje op een nummer tot rust komt. Op dat moment verdwijnt de onzekerheid en gaat deze over in informatie. Maar neem nu een ander soort informatie. Een tekstpagina creëert onzekerheid en neemt die eveneens weg, maar deze onzekerheid is niet dezelfde als die van kansspelen. Om te beginnen is de onzekerheid minder. Onder normale omstandigheden kan een roulettespeler niet voorspellen wat de uitkomst van de volgende draai aan de schijf zal zijn. De lezer van de tekstpagina verkeert daarentegen niet in een dergelijke staat van onwetendheid. Hij kan de volgende letters of woorden voorspellen op grond van wat hij al heeft gezien. Als we hem een half woord geven, kan hij vaak de andere helft voorspellen of er een redelijke slag naar slaan. Dat komt omdat de taal, anders dan muntstukken en rouletteschijven, een systeem is waarin niet alle uitkomsten even waarschijnlijk zijn.

Een geschreven boodschap is nooit geheel onvoorspelbaar. Als dat wel zo was, zou de boodschap onzin zijn en alleen ruis bevatten. Om begrijpelijk te zijn en betekenis over te dragen, dient de boodschapper zich naar regels van spelling, structuur en betekenis te schikken en deze regels, die van tevoren als tussen schrijver en lezer gedeelde informatie bekend is, perken de onzekerheid in. Zij maken de boodschap gedeeltelijk voorspelbaar en dwingen haar extra bagage in de vorm van overbodige symbolen mee te voeren. Regels zijn een vorm van redundantie en zijn er verantwoordelijk voor dat taalboodschappen zich onderscheiden van de 'boodschappen' die door het rouletteballetje worden overgebracht. De rouletteboodschappen zijn immers even waarschijnlijk. Taalregels maken echter bepaalde letters, groepen van letters en zelfs bepaalde woordvolgorden waarschijnlijker dan andere en daardoor voorspelbaarder.

In vrijwel elke tekst kunnen woorden worden geschrapt zonder dat de bedoeling van de auteur voor de lezer onbegrijpelijk wordt. En veel woorden zijn nog steeds begrijpelijk als er een of meer letters uit worden verwijderd. In kleine kranteadvertenties bijvoorbeeld kunnen woorden en letters uit een zin worden weggelaten om zoveel mogelijk informatie in een kleine ruimte te kunnen persen en de zin toch nog haar functie - het sturen van een boodschap naar de lezer - te laten vervullen. Een boodschap als

flt 6e cv 7 x 15 casco k.k. incl. 150.000

draagt de gehele betekenis van een veel langere zin over, vooropgesteld dat ze precies in die vorm wordt gezet.

Evenals in andere talen is de redundantie in het Nederlands niet eensoortig. Een type redundantie bestaat uit spellingsregels en het gevolg van zulke regels is dat in een tekst van redelijke lengte sommige letters vaker voorkomen dan andere. In het Nederlands verschijnt de letter 'e' heel vaak, meer dan viermaal

zo vaak als wanneer zinnen zouden worden gevormd door het willekeurig aan elkaar rijgen van letters. Deze onevenredige waarschijnlijkheid in het gemiddelde gebruik van verschillende letters werd ingezien door Samuel Morse toen hij zijn morsecode ontwierp. Morse was een belangrijke voorloper van Shannon en Wiener, met dien verstande dat hij zich bewust was van de statistische regelmatigheden van de taal en de vaste patronen waarin sommige letters vaak verschijnen en andere minder vaak. Daarom kende hij aan veelvuldig gebruikte letters korte puntjes en streepjes toe zodat hij ze gemakkelijk en vlug kon verzenden, en langere reeksen aan letters die betrekkelijk weinig voorkomen. De letter 'e' bijvoorbeeld, die ook in het Engels de meest frequente letter is, codeerde hij op de kortst mogelijke manier: een enkele punt.

Een tweede type redundantie komt voort uit het feit dat de waarschijnlijkheid dat een bepaalde letter in een woord optreedt min of meer afhangt van de letter of letters die eraan voorafgaan. In het Engels is het voorbeeld van zo'n regel: 'i' voor 'e' behalve na 'c' (men zie 'retrieve', maar bijvoorbeeld 'receive'). Vaak is het tamelijk eenvoudig de letter te voorspellen die op een bepaalde reeks letters zal volgen. In het Nederlands worden de letters 'sc' waarschijnlijk, maar niet absoluut zeker gevolgd door de letter 'h'. En in zowel het Engels als het Nederlands volgt op een 'q' met aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid een 'u'.

Beide typen redundantie beperken de vrijheid van de taal om volmaakt willekeurig of grillig te zijn, maar het tweede type laat meer ruimte dan het eerste. Het verschil tussen deze twee methoden van keuzebeperking heeft 'niet-triviale' gevolgen, zoals de wetenschap het formuleert. De volledige betekenis ervan zullen we inzien als we kijken naar het informatiesysteem van de genen.

Shannon probeerde op verschillende manieren de mate van redundantie in een Engelse tekst te schatten. Hij gebruikte daarbij zijn kennis van geheime codes om een alinea van een stuk proza te comprimeren en alle overtoollige voorspelbaarheid eruit te persen. Hij produceerde zinnen met absolute onzin door lukraak letterreeksen te typen en vervolgens de redundantieregels stapsgewijs te programmeren, waardoor de statistiek van elke reeks steeds meer op die van Engels proza ging lijken.

Hij deed ook diverse spelletjes waarbij een boek zo maar ergens werd opengeklapt en de eerste letter van een zin hardop werd voorgelezen. De deelnemers aan het spel werd dan gevraagd de volgende en de daarop volgende letter te raden en zo tot het eind van de zin door te gaan. Raadde een speler een letter niet, dan kreeg hij deze als aanwijzing en werd hem gevraagd met raden door te gaan. Hieronder volgt het resultaat van zo'n spelletje. Een streepje onder een of meer letters in de reeks geeft aan dat de speler deze goed heeft geraden. Als een letter op de tweede regel wordt herhaald, zat de speler ernaast en moest hij worden bijgestuurd.

THE ROOM WAS NOT VERY LIGHT A SMALL OBLONG
 - - - -ROO - - - - -NOT-V - - - - -I - - - - -SM - - - -OBL - - -

READING LAMP ON THE DESK SHED GLOW ON
 REA - - - - -O - - - - -D - - - -SHED GLO - - O -

POLISHED WOOD BUT LESS ON THE SHABBY RED CARPET.
 P - L - S - - - - -O - - - -BU - -L - S - -O - - - - -SH - - - - -RE - - C - - - - -.

Er zijn 103 letters in de hele zin, maar de speler hoefde er maar 40 van te weten. Met deze aanwijzingen kon hij de rest van de zin helemaal voorspellen. Met andere woorden, vanuit het gezichtspunt van de speler waren 63 letters redundant omdat die voorspelbaar waren op grond van kennis van spelling, structuur en betekenis.

Shannon concludeerde dat het Engels voor ongeveer 50% redundant is wanneer we steekproeven van acht letters in aanmerking nemen. Als de grootte van de steekproef toeneemt, wordt de redundantie veel groter. Voor reeksen tot 100 letters stijgt ze tot ongeveer 75%. Dit percentage wordt zelfs groter bij hele bladzijden of hoofdstukken waarin de lezer een idee kan krijgen van de lange-termijnstatistiek van de tekst, met inbegrip van thema en literaire stijl. Dit betekent volgens Shannon dat een aanzienlijk deel van wat we schrijven wordt gedeclareerd door de taalstructuur en ons min of meer wordt opgedrongen. Slechts het weinige dat resteert komt voort uit eigen vrije wil.

Hoe sterk een schrijver precies in zijn keuzevrijheid wordt beknot, kan per auteur verschillen. In zijn geestdriftig zoeken naar vernieuwing vergrootte James Joyce zijn vrijheid door enkele taalregels overboord te gooien. In *Finnegans Wake* stond hij zichzelf een veel grotere verscheidenheid van mogelijke boodschappen toe dan bijvoorbeeld Jane Austen, die de regels nauwgezet volgde. Letters en woorden zijn niet gemakkelijk te voorspellen in een boodschap als

The howsayto itishwatis hemust whomust worden schall. A darktongues, kunning. O theoperil! Ethinop lore, the poor lie. He askit of the hoothed fireshield but it was untergone into the matthued heaven,

waarin heel wat onzekerheid is gecreëerd.

Hier komt een uiterst belangrijk punt naar voren. In bovenstaande regels uit *Finnegans Wake* is moeilijk te raden wat volgt. Het is ook moeilijk zelffouten en vergissingen te ontdekken. Deze passage is daarom minder betrouwbaar dan een fragment uit het werk van Jane Austen: de nauwkeurigheid ervan vertrouwen we niet zo. Joyce deelt deze onbetrouwbaarheid met de filosoof Alfred North Whitehead, wiens boeken vol staan met nieuwbakken idiosyncratische woorden en zinnen. Als hij eenmaal klaar was met een manuscript, waste Whitehead zijn handen in onschuld erboven. Hij weigerde elke bemoeienis met het proces van redigeren en publiceren: dit vond hij verspilling

van waardevolle tijd, maar het resultaat was dat zijn boeken vol fouten staan, die slechts door vakgenoten kunnen worden ontdekt. Zelfs vele jaren later, toen hij toch tijd genoeg had gehad om de zetfouten te corrigeren, vond een groep mensen die Whitehead bestudeerden meer dan 200 slordigheden in *Process and Reality*, een van zijn hoofdwerken, en sindsdien zijn er nog meer aan het licht gekomen.

Redundantie reduceert fouten door bepaalde letters en groepen letters waarschijnlijker te maken en daardoor de voorspelbaarheid te vergroten. Woorden omvatten meestal meer letters dan strikt noodzakelijk is om ze te begrijpen. Het is zelfs mogelijk de onvoorspelbaarheid van een reeks symbolen te toetsen door ze te comprimeren, compacter te maken. Als de reeks niet kan worden gecomprimeerd, is ze volkomen onvoorspelbaar. Kan dat wel, dan is ze enigszins redundant. De comprimering vernietigt echter de, in alle talen aangetroffen, ingebouwde beveiliging tegen fouten.

De recentelijk in de mode gekomen argumenten voor 'Black English' in de Verenigde Staten zijn gedeeltelijk gebaseerd op de vooronderstelling dat gewoon Engels proza kan worden gecomprimeerd en dan toch zijn informatie-inhoud behoudt. Prof. William Lasher gaf voorbeelden van Black English met verminderde redundantie. Twee hiervan zijn: 'We was at the ball game last night' en 'Mary had five card'. Volgens Lasher had de spreker van de eerste zin besloten dat er geen fundamenteel onderscheid is tussen 'was' en 'were', omdat op grond van de context duidelijk is dat het werkwoord in het meervoud staat en een zelfstandig naamwoord in het meervoud met een werkwoord in het meervoud redundant is. In de tweede zin slikt de spreker de laatste 's' van het woord 'cards' in, omdat het gebruik van het woord 'five' ons al heeft verteld dat er meer dan een kaart was. Lasher ziet dit als een logische poging om de taal te vereenvoudigen. John Simon, een cynische behoeider van de zuiverheid van de Engelse taal, bracht daar tegen in dat we om verwarring vragen als we op deze manier de regels geweld aandoen. 'Natuurlijk geeft "five" het meervoud aan maar de laatste "s" bevestigt dit', was Simons commentaar. De spreker kan per slot van rekening 'a fine card' hebben gezegd en dan verzekert de laatste 's' dat we hem goed hebben verstaan.

Er is nog een ander aspect van redundantie van groot belang en dat is de rol die ze speelt om systemen - zowel biologische organismen als kunstmatig intelligente machines - in staat te stellen complex te worden. Dank zij het werk uit de laatste jaren van wiskundigen en ingenieurs hebben de ideeën omtrent het wezen van complexiteit een verandering ondergaan. Complexiteit is zo'n belangrijk begrip en haar eigenschappen zijn zo verrassend, dat ze een eigen hoofdstuk verdient. Maar nu is het voldoende om dit centrale feit op te merken: redundantie maakt complexiteit mogelijk. Hierop wees John von Neumann in zijn artikelen over de computer, artikelen die overvloedig van inzicht in het wezen van de informatieprocessen die pas na zijn dood door

anderen werden ontwikkeld. Von Neumann zag in dat de structuur van levende organismen en machines in hoge mate wordt voorgeschreven door de manier waarop ze te kort schieten en onbetrouwbaar worden. Het te kort schieten, zei von Neumann, moet niet worden opgevat als een afwijking, maar als een wezenlijk, onafhankelijk deel van de logica van complexe systemen. Hoe complexer het systeem, des te waarschijnlijker dat een van zijn delen niet naar behoren zal functioneren. Redundantie is een middel om systemen draaiende te houden in het geval van storing. Alleen door redundantie, verklaarde von Neumann,

is het mogelijk een tekst van meer dan, zeg, tien bladzijden te schrijven. Met andere woorden, een taal met maximale verdichting zou werkelijk totaal ongeschikt zijn om informatie over te brengen die een bepaalde mate van complexiteit te boven gaat, omdat we nooit zouden kunnen weten of de tekst goed is of fout. En dat is een principekwestie. Hieruit volgt dat de complexiteit van het medium waarmee wij werken iets met redundantie te maken heeft.

Shannon zelf zei me te geloven dat de meest belovende nieuwe ontwikkelingen in de informatietheorie uit het werken aan zeer ingewikkelde machines zullen komen, in het bijzonder uit het onderzoek naar kunstmatige intelligentie.

Redundantie maakt waarschijnlijkheden ongelijk in plaats van ze over de hele variatiebreedte te verspreiden. Dit betekent dat de delen van een systeem niet geheel onafhankelijk van elkaar zijn, maar statistisch verbonden volgens een patroon van mogelijkheden. In een boodschappensysteem houdt redundantie de informatie enigszins in balans tussen totale beperking en totale vrijheid. Zoals Fran Lebowitz, een Newyorkse essayiste, eens opmerkte over het communisme en het fascisme: 'Het eerste is te saai, het tweede te opwindend.' Maar hoewel redundantie beperkingen oplegt, kan deze daarbinnen ook tot grote complexiteit leiden. Regels die een vorm van redundantie zijn, genereren in de taal een enorme rijkdom aan expressie. Maar zij lijken op een onverwachte manier ook verband te houden met creatieve vrijheid en met hoogtepunten van artistieke expressie op vele gebieden. In een interview in 1980 zei de violist Isaac Stern over de relatie tussen beperkingen en het vermogen om muziek met een grote 'M' te maken:

Slechts zelden realiseert men zich dat het werkelijk creatieve gebeuren voortkomt uit de allerstrengste discipline, omdat je pas weet wat mogelijk is als je jezelf door en door onder controle hebt. Dat is het moment waarop je je verbeeldingskracht laat gaan, omdat je weet dat je door discipline, studie en nadenken de grenzen hebt gecreëerd. [...]

Als je jezelf werkelijk discipline hebt opgelegd en je de mogelijkheden kent die je omwille van smaak en kennis niet durft te overschrijden, dan is dat het ogenblik waarop er werkelijk iets begint te komen, dat je alle starheid van je afgooit en gewoon muziek maakt.

6. WORSTELLEN MET WILLEKEUR

Shannon koos als zijn eenheid van informatie de 'binary digit' (binair getal) of bit. Een bit is een maat voor de hoeveelheid informatie, net zoals liter, gram en meter dat zijn voor volume, massa en lengte. Een bit is niet meer dan een keuze tussen twee even waarschijnlijke boodschappen. Het is het antwoord 'ja' of 'nee' op de hypothetische vraag: 'Is het deze?' Het antwoord 'ja' lost alle onzekerheid op in de gedachten van degene die de boodschap ontvangt, omdat hij weet welke van de twee mogelijke boodschappen de echte is. Ook het antwoord 'nee' neemt zijn onzekerheid weg omdat hij weet dat de echte boodschap niet het eerste, maar het tweede alternatief is.

Deze code is erg ruim toepasbaar omdat ze maar twee symbolen nodig heeft:

1 voor 'ja'
0 voor 'nee'

Een 1 kan als een elektrische puls langs een radio- of telegrafiekanaal worden verstuurd, een 0 kan worden 'vertaald' als het uitblijven van een impuls. Zij kunnen ook worden weergegeven door een schakelaar aan of uit te doen. Als regen even waarschijnlijk is als het uitblijven ervan, hoeft slechts één vraag te worden gesteld: 'Regent het?' De transmissie van een 1 of een 0 geeft dan het antwoord. Hetzelfde geldt bij de keuze tussen kop en munt bij het opgooien van een muntstuk of tussen rood en zwart of even en oneven in het roulettospel (aangenomen dat er geen nul is). Het verzenden van een bit geeft dan volledige informatie over de toestand van de respectieve systemen.

Bij meer dan twee keuzemogelijkheden zijn meer bits nodig om de onzekerheid omtrent wat werkelijk is gekozen weg te nemen. Veronderstel dat er niet twee, maar vier alternatieven zijn voor de uitkomst van een draai aan de rouletteschijf: rood en even, zwart en even, rood en oneven, zwart en oneven. Nu wordt de onzekerheid in twee bits gemeten in plaats van één, omdat twee vragen gesteld moeten worden die elk de onzekerheid halveren: 'Is het even, of rood, of zwart?'

Als het antwoord 0 of 'nee' is, wordt de volgende vraag: 'Is het rood en oneven?' Als het antwoord weer 'nee' is, wordt alle onzekerheid weggelaten omdat we dan weten dat de werkelijke uitkomst de vierde mogelijkheid was: zwart en oneven. De verdubbeling van het aantal mogelijke boodschappen vergroot op die manier de onzekerheid met een vraag waarop een antwoord 'ja' of 'nee' mogelijk was. Met andere woorden: met een bit.

De procedure is echter minder eenvoudig als niet alle mogelijkheden even waarschijnlijk zijn en het systeem redundantie bevat. Als een stuiver herhaaldelijk wordt opgegooid kan de informatie over het resultaat van elke worp worden gecodeerd als een stroom van bits, die stuk voor stuk de onzekerheid

over elke worp wegnemen, omdat kop en munt verondersteld worden even waarschijnlijk te zijn. Maar wanneer de boodschap een zin is, ontstaat er een heel andere situatie omdat niet elke letter van de zin even waarschijnlijk is. Bepaalde letters of lettergroepen die niet veelvuldig voorkomen - die 'onwaarschijnlijk' zijn - hebben meer bits of ja/nee-antwoorden nodig om gecodeerd te kunnen worden. Het in onze taal vaak gebruikte letterpaar 'ch' kan in twee bits worden gecodeerd, terwijl een weinig voorkomend paar als 'qs' er zeven of acht keer zoveel nodig zou hebben. De reden daarvoor is dat in het spectrum van mogelijkheden het waarschijnlijke meer 'ruimte' inneemt dan het schaarse.

Stel dat een corpulente man op de linkerhelft van een bank zit en twee magere mannen op de rechterhelft zitten. We hoeven slechts een vraag over de plaats van de corpulente man te stellen: 'Zit hij op de rechterhelft van de bank?' Het antwoord 'nee', gecodeerd als 0, neemt alle onzekerheid weg. Maar de onzekerheid over de plaats van een magere man kan alleen door het antwoord op twee vragen worden opgeheven. Op de eerste vraag: 'Zit hij op de rechterhelft?' moet het antwoord 'ja' zijn, gecodeerd als 1. Er dient echter nog een vraag te volgen: 'Zit hij op de linkerhelft van de rechterhelft?' Pas wanneer die vraag met 'ja' of 'nee' is beantwoord, is aan alle onzekerheid een eind gekomen. De corpulente man die waarschijnlijker is, wordt in een bit, 0, gecodeerd, maar de magere mannen, die minder waarschijnlijk zijn, worden elk in twee bits gecodeerd: 1-0 of 1-1.

Deze eenvoudige procedure kan tot grote hoogte van verfijning worden uitgewerkt. Bij de transmissie van televisieprogramma's bijvoorbeeld, een probleem waarin Shannon hevig was geïnteresseerd, veranderen veel van de minuscule puntjes die te zamen het beeld op de buis vormen, lange tijd niet ondanks de verandering van andere delen van het beeld. De niet veranderende puntjes zijn waarschijnlijker en kunnen in kortere, simpeler vorm worden gecodeerd dan de minder voorspelbare puntjes die veelvuldig veranderen.

Een van de belangrijkste vragen die Shannon probeerde te beantwoorden was of een boodschap, die vanwege haar deels voorspelbare en deels onvoorspelbare aard in een reeks bits is gecodeerd, via een kanaal kan worden verstuurd zonder dat haar orde door ruis wanordelijk wordt. Zijn werkzaamheden aan militaire codes tijdens de oorlog gaven hem enig inzicht in dit probleem, omdat aan een bericht in code de sleutel tot de code zelf is toegevoegd, min of meer op dezelfde wijze als waarop in het normale communicatieverkeer ruis aan een boodschap wordt toegevoegd. In het eerste geval is de toevoeging nuttig, in het tweede geval hinderlijk. Om een geheime militaire boodschap te kunnen ontcijferen, moet de sleutel worden gescheiden van de boodschap; de gedachte achter het ontwerpen van een code is juist de code en de sleutel zodanig te maken dat het aanbrengen van deze scheiding voor de vijand een buitengewoon lastige taak wordt. Een code voor gewone radio-uitzendingen in

vredestijd heeft echter precies het tegenovergestelde doel. Deze code moet zo zijn ontworpen dat het scheiden van boodschap en ruis zo gemakkelijk mogelijk is.

Het was een prestatie van Shannon dat hij, in zijn artikelen van 1948, aantoonde dat een bericht foutloos van de ene plaats naar de andere kan worden verzonden, ongeacht communicatiesysteem en ruis, zolang het maar op de juiste manier is gecodeerd. Weliswaar legt de natuur een beperking op in de vorm van de capaciteit van het communicatiekanaal, maar zolang het kanaal echter niet is overbelast, garandeert de code net zoveel accuratesse als we willen. Dat dergelijke codes bestaan bewees Shannon in de beroemdste van zijn stellingen, die gaat over een kanaal met ruis, in de wandeling Shannons tweede theorema genoemd. Het was destijds een van de grootste intellectuele ontdekkingen omdat het haaks leek te staan op het gezonde verstand. Door te laten zien dat betrouwbare informatie in een onbetrouwbare wereld mogelijk is, verwierf het tweede theorema de status van algemeen beginsel, omdat 'informatie' - op de nieuwe manier gedefinieerd - universeel is. Ze is een aspect van het leven zelf, niet alleen van de communicatietechnologie.

Foutendetecterende en -corrigerende codes zijn soms heel vernuftig, maar in principe verzekeren zij volmaaktheid te midden van onvolmaaktheid en orde ten opzichte van wanorde door precies het juiste type redundantie toe te voegen. De vermelding van het aantal woorden door de telegrafist aan het eind van een telegram is een heel eenvoudig voorbeeld van een foutendetecterende code. Op de plaats van bestemming kan men in een oogopslag zien of er tijdens het overseinen soms woorden verloren zijn gegaan. Een nog meer geavanceerde vorm van redundantie is de foutencorrigerende code. Deze kan fouten herstellen zonder voor meer informatie naar de bron terug te hoeven gaan, zoals in het geval van het telegram. Als een boodschap gecodeerd in bits (nullen en enen) langs een kanaal wordt gestuurd, is het mogelijk het aantal fouten in de boodschap te beheersen door een extra bit (controlebit) als een soort korte beschrijving aan het eind van elke reeks toe te voegen. Een toegevoegde 0 zou bijvoorbeeld kunnen betekenen dat als alle cijfers in de reeks bij elkaar worden opgeteld, er een even getal uit moet komen; een 1 staat dan voor een oneven getal. Als het totaal oneven is terwijl de code beweert dat het even moet zijn, is er een fout in de reeks geslopen. Met een meer ingewikkelde versie van deze code is het mogelijk fouten op het individuele bit op te sporen door middel van cross-checking. Als eenmaal is gebleken dat een cijfer fout is, is dat eenvoudig genoeg te herstellen. Aangezien een cijfer steeds een 0 of een 1 is, moet als de een fout is, de ander wel goed zijn. De boodschap corrigeert dus zichzelf.

Op het eerste gezicht lijkt het misschien dat er zoveel redundante bits aan de boodschap moeten worden toegevoegd om bij veel ruis toch hoogst betrouwbaar te kunnen communiceren, dat er geen tijd is ze allemaal over te sturen. Maar dat is niet zo. Er bestaat een methode om berichten zo te coderen dat

men ze snel en nauwkeurig kan versturen. Het tweede theorema garandeert juist dat informatie langs een kanaal met ruis kan worden verzonden met de hoogste snelheid die de capaciteit van het kanaal toelaat en daarbij toch juist zo weinig fouten bevat als we acceptabel vinden.

Enkele van de meest uitgewerkte codes die voortkwamen uit het werk van Shannon, zijn ontworpen voor het Amerikaanse ruimtevaartprogramma. Wetenschappers zagen zich daarbij voor het probleem geplaatst om zeer zwakke signalen afkomstig van buiten de aardse dampkring te herstellen. In 1962, toen het programma nog in de kinderschoenen stond, konden er slechts 2000 bits per seconde worden overgeseind. Tegenwoordig is dit aantal veel groter en is de techniek zo ver gevorderd, dat we mogen verwachten binnen niet al te lange tijd een transmissiesnelheid van 500 000 000 bits per seconde of een halve 'gigabit' te bereiken.

De redundantie van deze bijzonder ingewikkelde codes is groot, maar niet onhanteerbaar. Toen de Voyager-II in 1981 beelden van de ringen van Saturnus naar de aarde stuurde, bedroeg de redundantie 100%; met andere woorden, op elk informatiebit was er een redundant bit. Het foutpercentage van de Voyager II-code was één op de tienduizend bits. De ruimtetelescoop die in 1985 in een baan om de aarde is gebracht, maakt gebruik van een code met drie redundante bits op elk informatiebit. De zender van de ruimtetelescoop heeft zo'n hoge redundantie nodig omdat hij is ontworpen om informatie te verzamelen en door te geven over verschijnselen als de temperatuur van het melkwegstelsel en de achtergrondstraling, informatie die zelf een grote mate van verstrooiing en dus onzekerheid bevat. Uiteindelijk zijn deze relatief hoge redundantieniveaus noodzakelijk omdat ruimtevaartuigen te klein zijn om grote, krachtige zenders te dragen. Hun signalen zijn daarom zwak en ruisgevoelig. Voor het grondstation dat de radioverbinding met het ruimtevaartuig onderhoudt zijn de coderingseisen veel minder stringent, omdat het net zulke krachtige signalen kan uitzenden als gewenst is. Een redundantie van 14% is voldoende.

Shannon bewees dat er een ideale code bestaat die binnen de restricties van de kanaalcapaciteit net zoveel precisie verschaft als we willen. Hij zette deze code, die weleens de Heilige Graal van de informatietheorie is genoemd, niet echt op papier maar toonde aan dat, ook al is de ideale code te gecompliceerd en te duur voor praktische toepassing, hij wel een volmaakte limiet is die ingenieurs net zo dicht kunnen naderen als ze verkiezen. Als een bepaalde code een fout van één op de tien miljoen cijfers toelaat, is het altijd mogelijk een andere code te vinden die een fout van één op de twintig miljoen geeft door op de juiste manier redundantie toe te voegen. Als ingenieurs merken dat de boodschappen die ze versturen traag en onbetrouwbaar zijn, weten ze dat ze niet de natuur de schuld van deze magere vertoning kunnen geven. Het verwijt treft henzelf, omdat zij de code niet slim genoeg hebben ontworpen.

Het tweede theorema bewijst dat de prijs voor de beveiliging van de zuiverheid van de informatie niet zo exorbitant hoog is dat ze het versturen van een grote verscheidenheid van boodschappen uitsluit. Als het steeds herhalen van

dezelfde cijferreeks de enige manier zou zijn om redundantie toe te voegen, zouden er weinig boodschappen worden verzonden. Extreem gesteld: de redundante bits zouden de informatiebits overspoelen. Om een oneindig kleine fout te bereiken, zou de zender dezelfde boodschap een oneindig aantal malen moeten herhalen. Het resultaat zou volstrekt monotoon zijn, terwijl hét doel van communicatie juist het verzenden van vele verschillende boodschappen is. Er moet enige beperking zijn, maar ook wat vrijheid.

Het tweede theorema staat toe dat verscheidenheid en precisie naast elkaar bestaan. Het vergunt het nieuwe te bloeien en toch betrouwbaar te zijn. De vraag die wetenschapsmensen nu stellen, is of de natuur zelf dergelijke redundante codes heeft ontworpen om de betrouwbaarheid van levensvormen te beschermen. De evolutie heeft een immense hoeveelheid variatie opgeleverd; het is een 'inventief' proces. Anderzijds is er in het dierenrijk een grote onderliggende gelijkvormigheid. Er zijn dus grenzen aan de variatiebreedte die de natuurlijke selectie toestaat. Lila Gatlin, een Amerikaanse biofysica, heeft de mogelijkheid geopperd dat de grote doorbraken in de evolutie, de momenten waarop uit primitieve levensvormen echt veelbelovende wezens naar voren kwamen, ook die momenten waren waarop het boodschappensysteem van de genen een optimale variatie koppelde aan een optimale foutbeheersing. Gatlin noemt dit proces 'tweede theorema-evolutie' als erkenning van Shannons uiterst elegante en wijze vondst.

DEEL II

De natuur als informatieproces

7. PIJLEN IN ALLE RICHTINGEN

De 'tijdpijl' (arrow of time) is een door sir Arthur Eddington bedachte metafoor die uitdrukking geeft aan het denkbeeld dat er een zuiver fysiek onderscheid bestaat tussen verleden en toekomst, los van het bewustzijn. Zo'n onderscheid is gebaseerd op het entropieprincipe, volgens hetwelk energie bij het verstrijken van de tijd neigt tot transformatie van een ordelijke naar een minder ordelijke vorm. Volgens Eddington verschilt vroeger van later omdat 'vroegere' energie hoger is georganiseerd. Om te verklaren waarom *nu* niet hetzelfde is als *toen*, is een beroep op de geestelijke gewaarwording van het verstrijken van de tijd niet nodig. Het is een kwestie van organisatiegraad. Als langs de weg van de pijl steeds meer willekeur is, wijst hij naar de toekomst; is er steeds minder willekeur, dan wijst hij naar het verleden. In tegenstelling tot de ruimte die geen voorkeursrichting kent, is de tijd asymmetrisch, altijd in voorwaartse, nooit in teruggaande beweging, en zo blijft hij zich gedragen, ongeacht of er mensen zijn om dit te ervaren. De tijdpijl is onomkeerbaar omdat entropie niet vanzelf kan afnemen zonder de tweede hoofdwet van de thermodynamica te schenden. Een omkeerbare pijl zou als een film zijn die wordt teruggedraaid. De scènes uit de film zijn volgens de wetten van de klassieke mechanica niet onmogelijk, maar zijn wel volkomen belachelijk. Volgens Eddington garandeert alleen het eenrichtingverkeer van de fysische tijd - van meer naar minder organisatie - een zinvolle wereld.

Het gezonde verstand zegt ons echter dat hier iets niet deugt. Als de tijdpijl de weg van de toenemende willekeur volgt, veegt hij informatie uit. En toch is de geschiedenis niet het verslag van uiteenvallende gebeurtenissen die in de chaos verdwijnen, maar van nieuwe vormen van orde en een steeds rijkere informatievoorraad. De tocht van de geschiedenis door de eeuwen en millennia heen is een kroniek van het nieuwe: nieuwe structuren, nieuwe organismen, nieuwe beschavingen, nieuwe ideeën. Informatie als maat voor het nieuwe neemt met het verstrijken der jaren eerder toe dan af.

David Layzer, een astronoom van de Harvard-universiteit, heeft onlangs de theorie gelanceerd dat het universum eenvoudig begint, maar naarmate de tijd verstrijkt steeds complexer en rijker aan informatie wordt. Op elk volgend moment van zijn geschiedenis bevat het universum iets volkomen nieuws. Daarbij doelt Layzer niet alleen op de planeet aarde met haar weelde aan levensvormen, maar op de kosmos als geheel.

Hierin schuilt zeker een paradox als, zoals Eddington beweert, de tijdpijl geacht wordt in de richting van toenemende entropie en wanorde te wijzen. Want volgens recente, zeer gedetailleerde reconstructies van de geboorte van het heelal, stapsgewijs in fracties van een seconde, kan van de tijd net zo goed worden gezegd dat hij de richting van *grotere* orde en complexiteit opgaat. Een tweede paradox komt voort uit het feit dat onder de buitenlaag van de

materie, in de microkosmos van deeltjes en krachten, de fundamentele fysische processen - op een enkele uitzondering na - omkeerbaar zijn. De achterwaarts lopende film mag dan onzin zijn, maar de gebeurtenissen die hij uitbeeldt schenden deze microscopische natuurwetten niet. Deze zijn bijna volledig symmetrisch in de tijd. Ze schenden alleen de statistische, 'feitminnende' onderstellingen die uit het entropieprincipe voortkomen.

Layzer zoekt naar een uitweg uit deze paradoxen door aan te nemen dat er niet een, maar drie tijdpijlen zijn. De eerste is de pijl van de kosmische uitdijing die van het aanvangsstadium van het universum, toen dat oneindig samengeballd en homogeen was, vandaan wijst. De tweede is de pijl van de geschiedenis, die door alle rijke, ontwikkelde structuren als melkwegstelsels, sterren, planeten, leven, beschaving en geest wordt bepaald. De derde is de thermodynamische pijl, de pijl van de toenemende entropie, die door het uiteenvallen van macroscopische structuren wordt voortgebracht.

In de theorie van Layzer wijst de geschiedenispijl onomkeerbaar in de richting van toenemende complexiteit en toenemende informatie. In tegenstelling tot een aantal astronomen van onze tijd gaat Layzer ervan uit dat het universum niet in een evenwichtsloze toestand is begonnen en naar een toestand van evenwicht of maximale entropie onderweg is. Volgens hem hoefde het heelal bij zijn geboorte geen enkele structuur te hebben. Als de 'big bang'-theorie van de kosmische genese juist is, kan het heelal geheel verstoken van informatie zijn ontstaan, zowel op de zeer kleine schaal van zijn microscopische deeltjes als op de grote macroscopische schaal van de waarneembare verschijnselen. Homogene wanorde voerde in het begin de boventoon. Informatie, opgevat als een maat voor de niet-homogene, ordelijke eigenschappen van fysische systemen, kwam voort uit dat beginstadium van volmaakte verwarring.

De kosmische uitdijing was de reden dat het universum, nog in de kinderschoenen, zijn toestand van maximale entropie verliet. Zolang als de processen die de verdeling van energie en de concentraties van de verschillende soorten deeltjes willekeurig maakten, zich snel voltrokken, sneller dan de kosmos uitdijde, kon het evenwicht gehandhaafd blijven. In de verwarring van deze zeer dichte, ongedifferentieerde toestand drongen deeltjes van atomen in elkaar met een dergelijke frequentie dat er geen structuur kon ontstaan. Maar deze toestand duurde slechts een fractie van een miljoenste seconde. De snelheid van de kosmische uitdijing was niet constant, en toen ze eenmaal hoger was dan die waarbij de krachten van de wanorde door botsingen informatie konden doen uiteenvallen, werd het chemische evenwicht verbroken. Toen de deeltjes elkaar minder vaak troffen als gevolg van de toenemende onderlinge afstanden, kon de gelijke verdeling van de verschillende soorten deeltjes niet meer worden gehandhaafd.

Aldus veranderde de chemische samenstelling van het universum van een toestand van evenwicht naar een van verstoord evenwicht naarmate het uitdijen voortging en die verandering zou zwaarwegende gevolgen hebben. Het is immers de chemische onevenwichtigheid van de zon die de bron is van vrije

energie waarvan al het leven op aarde afhangt. Als het uitdijen van de kosmos langzamer plaats had gevonden dan waarschijnlijk is gebeurd, zou alle materie erin louter as zijn geworden alsof een kolenvuur alle stukjes brandstof heel effectief had opgebrand. Maar omdat de krachten van evenwicht de uitdijning niet bij hielden, kon het universum al zijn brandstof niet verbruiken, daardoor konden lang brandende sterren als onze zon zich ontwikkelen en tenslotte het dieren- en plantenrijk tot stand brengen. De kosmische uitdijning schiep dus een verzameling beginvoorwaarden waardoor twee zeer van elkaar verschillende soorten orde-voortbrengende processen mogelijk werden: kosmische en biologische evolutie. De richting van dit laatste proces is eveneens onomkeerbaar; afgewend van eenvormigheid en gericht op nieuwe structuurvormen en grotere complexiteit. Het volgt een weg in de tijd die beschreven wordt door de pijl van de geschiedenis. Langs deze weg wijst ook de thermodynamische pijl, omdat entropie van nature ontstaat als het resultaat van dezelfde processen die levende systemen doen ontstaan en de motor van de menselijke beschaving doen lopen, met haar toenemende afhankelijkheid van de energie-afbrekende apparatuur van de moderne technologie. Maar de geschiedenispijl en de thermodynamische pijl zijn complementair en niet met elkaar in conflict. De een is niet natuurlijker of fundamenteeler dan de ander. Het standpunt dat Layzer betwist houdt in dat de groei van entropie een noodzakelijk kenmerk is van de wereld en de groei van orde op de een of andere manier toeval is. Dat is niet zo. Beide vloeien logisch voort uit de gebeurtenissen die voorvielen in het eerste ogenblik na de 'big bang'.

Entropie is ontbrekende informatie, zoals Boltzmann ruim honderd jaar geleden opmerkte. Waar gaat informatie dan naar toe als ze verdwijnt? In gesloten systemen wordt ontbrekende informatie omtrent de grote schaal van de macrokosmos omgezet in groeiende informatie over de kleine schaal van de microkosmos. Een analogie kan hier nuttig zijn. Stel dat in een spel kaarten de vier soorten, harten, klaveren, ruiten en schoppen, op oorspronkelijke volgorde liggen, maar dat elke kleur is geschud. Een speler kan nu niet precies weten waar bijvoorbeeld het hartenaas is, hoewel hij zeker weet dat het ergens in het bovenste kwart van het spel is. Stel vervolgens dat het hele spel wordt gesplitst in vier stapeltjes. Deze worden steeds gehalveerd totdat alle 52 kaarten met de beeldzijde op tafel liggen. Macroscopische informatie omtrent de toestand van het hele spel is in dit stadium volledig verdwenen. Microscopische informatie omtrent afzonderlijke kaarten is alles wat rest en om die te verkrijgen moeten de kaarten een voor een worden omgedraaid.

Layzer beweert dat macroscopische informatie in microscopische informatie vervalt, net als in het voorbeeld van het spel kaarten dat in steeds kleinere stapeltjes wordt gesplitst, zodat haar hoeveelheid in principe constant blijft. Wat gelijkvormig is op grote schaal, kan zeer ongelijkvormig zijn op kleine schaal. Maar in werkelijkheid wordt deze tweede soort informatie niet bewaard, als

gevolg van de processen van vermenging die in het universum aan de gang zijn. Ze wordt verstrooid en lost op in lukrake botsingen met verdwaalde, willekeurige deeltjes en krachten buiten het systeem. De entropie neemt toe en de informatie verdwijnt.

Het duiveltje van Maxwell kan alleen maar volledige informatie over alle moleculen in de wervelende microkosmos van het vat met gas krijgen, omdat het een ideaal, denkbeeldig wezen is. Zijn kamer is hermetisch afgesloten tegen alle soorten toevalstreffers en invloeden van buitenaf. Het duiveltje bewoont een volmaakt gesloten systeem, dat in werkelijkheid niet bestaat, omdat bijvoorbeeld rekening moet worden gehouden met de werking van een niet-plaatsgebonden kracht als de zwaartekracht. Men schat dat de micro-toestand van een gas in het laboratorium binnen een fractie van een seconde belangrijk wijzigt als een gram materie op een afstand als die van Sirius, de hondsster, een luttel centimeter zou bewegen. Als een niet-denkbare wetenschapper volledig geïnformeerd wil zijn over het gedrag van alle micro-deeltjes in een afgesloten gasvolume op een zeker tijdstip om te kunnen voorspellen hoe zij zich op een toekomstig tijdstip zullen gedragen, moet hij de versturende invloeden buiten het vat kennen. Vervolgens zou hij de versturende invloeden op die invloeden moeten weten en aldus zijn web van vragen steeds verder moeten uitspinnen, totdat hij op de hoogte is van het kleinste detail van elk deeltje en elke kracht in het universum.

Deze kolossale beschrijvingstaak, die voor een gewone sterveling belachelijk hoog gegrepen zou zijn, kan misschien worden volbracht door een kosmische maxwelliaanse duivel, een geweldig universeel intellect naar het door de Franse markies Pierre Simon de Laplace in de achttiende eeuw voorgestelde model, toen kennis onbegrensd leek. De Laplace veronderstelde dat een reusachtige geest die, zonder ook maar een van de natuurkundige wetten geweld aan te doen, alles zou kunnen weten wat er te weten valt van het gedrag van elk deeltje in het universum, in staat zou zijn de hele geschiedenis van de kosmos van de eerste tot de laatste dag te beschrijven: 'Niets zou onzeker zijn en verleden en toekomst zouden in zijn ogen heden zijn.'

Layzers hedendaagse radicale slotsom is dat algehele informatie omtrent het universum op het niveau van individuele deeltjes zelfs voor een laplaceaanse superintelligentie onmogelijk is. Hij doelt daarbij niet alleen op de onzekerheid van de quantummechanica, maar ook op bepaalde onverzettelijke beperkingen van de soorten van kennis van het universum. Deze beperkingen komen voort uit een kosmisch symmetrieprincipe dat in zijn theorie een centrale plaats inneemt.

Het is juist dat de microkosmos van een begrensd, eindig natuurkundig systeem uitputtend kan worden beschreven aan de hand van een eindige hoeveelheid informatie. Het blijkt echter dat het universum zelf bepaalde

onverwachte eigenschappen heeft waardoor het zich onderscheidt van de kleinere, lokale systemen die het bevat, zoals in de eerste plaats de acceptatie dat het universum onbegrensd is, hoewel het in de wetenschap nog steeds een open vraag is of het eindig of oneindig is. Een andere ongebruikelijke trek van het heelal is dat het, anders dan andere systemen, zich schikt naar wat het 'kosmologische principe' wordt genoemd.

Volgens deze overkoepelende wet van de kosmische symmetrie ziet het universum er vanuit elke uitkijkpost van een theoretische waarnemer eender uit. Dezelfde statistische patronen van melkwegstelsels verschijnen door de hele kosmos. Dank zij het kosmologische principe kan niets en niemand er een bevoorrechte, bijzondere plaats innemen. En als gevolg van deze bijzondere eigenschappen, zo redeneert Layzer, bestaat er geen informatie over de microkosmos van het universum als geheel. Ze kan niet worden gespecificeerd of verkregen. Deze fundamentele onbepaaldheid sluit de mogelijkheid uit om alles, behalve op grote schaal, van het universum te weten. Een algemene macroscopische beschrijving kan nooit worden uitgebreid door toevoeging van details van de fijne inwendige structuur. De betekenisdragende eigenschappen van de kosmos zijn daarom alle statistisch van aard en hebben betrekking op grote verzamelingen kleine deeltjes.

De klassieke opvatting hield in dat er in elk onbegrensd systeem op het ene ogenblik evenveel orde is als op ieder ander moment en dat we daarvan in principe alles kunnen weten. Het doet er niet toe hoe verward het systeem is. Wanneer een nieuw spel kaarten uit zijn verpakking wordt gehaald, weten we, zonder te kijken, hoe alle kaarten liggen, namelijk in de gebruikelijke volgorde waarin ze door de fabrikant worden afgeleverd. Als iemand het pak schudt liggen de kaarten niet meer in dezelfde maar in een nieuwe volgorde, die kan worden ontdekt door elke kaart te bekijken en te onthouden. Het hele spel heeft een kenbare, unieke volgorde. Het is zelfs mogelijk de volgorde van de kaarten te voorspellen nadat ze zijn geschud, aangenomen dat het schudden kan worden berekend. Een pokerspeler met slechte bedoelingen kan bijvoorbeeld een spel zo schudden dat de oorspronkelijke volgorde van de kaarten niet verloren gaat. Dit lijkt op het klassieke denkbeeld van een kosmische superintelligentie die alle deeltjes in het heelal in de gaten houdt, ook al zijn ze voortdurend in beweging.

Layzer concludeert:

Naar mijn mening kan de orde niet kenbaar zijn. Stel je een onbegrensde stapel speelkaarten zonder boven- en onderkant voor, waarin de pakken onbeperkt op elkaar zijn gelegd. Informatie omtrent de volgorde van de kaarten in een deel van de stapel zegt niets, omdat elke gegeven volgorde een oneindig aantal malen elders wordt herhaald, zoals de patronen van sterren en melkwegstelsels door het hele heelal worden herhaald. Het heeft geen zin te zeggen dat je je op deze of gene plaats in de stapel bevindt, zelfs niet als je alles van de volgorde van de kaarten ter plaatse af weet. Je weet dan nog niet waar je in de stapel bent, net zomin als de theoretische waarnemer weet waar hij zich in de kosmos bevindt. Het kosmologisch principe zegt dat hij dat niet weet, en ook niet kan weten.

Volgens Layzer onttaardt het heelal niet, zoals generaties denkers hebben aangenomen. De thermodynamische pijl wijst weliswaar naar toenemende entropie omdat grootschalige informatie naar informatie op kleinere schaal vervalt, die op haar beurt wordt verstrooid door willekeurige verstoringen van buitenaf. Maar het kosmische uitdijen, weg van de uniforme wanorde van de oerknal naar het hoger geordende fysische universum, schept voortdurend macroscopische informatie. Zijn pijl beschrijft de richting van een proces dat in eenvoudigheid begint en tot hoe langer hoe meer verscheidenheid leidt. Een klein stukje papier is voldoende voor het beetje informatie dat nodig is om de eerste ogenblikken van het universum *volledig* te beschrijven. Het zou de ruime en algemene wetten van de natuurkunde omvatten en bepalen wat mogelijk is, en verder bestaan uit een verzameling beperkingen die nauwlettender van toepassing zijn en grenzen aan de mogelijkheden opleggen.

Vanuit dit perspectief gezien brengt het universum gaandeweg zelf het nieuwe voort. Het gehoorzaamt wetten, maar is toch onvoorspelbaar. Het bevat altijd meer informatie dan er was. 'In de wereld van De Laplace komt niets overeen met het verstrijken van de tijd,' schreef Layzer.

Zowel voor de 'intelligentie' van De Laplace als voor de God van Plato, Galileï en Einstein, bestaan verleden en toekomst naast elkaar op gelijke voet, als de twee halve lijnen waarin een willekeurig gekozen punt een rechte lijn verdeelt. Maar als de door mij gepresenteerde theorieën kloppen, zal zelfs de allergrootste computer - het universum zelf - nooit over genoeg informatie beschikken om de eigen toekomstige toestanden te specificeren. Het nu bevat altijd een element dat echt nieuw is en de toekomst is nooit helemaal voorspelbaar. Omdat biologische processen ook informatie voortbrengen en wij door ons bewustzijn die processen rechtstreeks kunnen ervaren, neemt de intuïtieve waarneming van de wereld, zoals die zich in de tijd ontplooit, een van de diepst gewortelde eigenschappen van het universum op.

8. CHEMISCHE WOORDEN EN CHEMISCHE DADEN

Pas wanneer de genen in de eerste plaats worden beschouwd als informatie en in de tweede plaats als scheikunde, pas wanneer hun fundamentele rol als symbolen wordt ingezien, worden de muren tussen de ene wetenschap en de andere geslecht. De scheikunde heeft dan niet langer de exclusieve rechten op de genen. Ze worden dan een van de vele soorten symboolsystemen, waartoe ook het zeer rijke en uitdrukingskrachtige systeem van de menselijke taal behoort.

Een belangrijke eigenschap van taal is dat haar symbolen weliswaar gebruikt kunnen worden om fysieke gevolgen in de echte 'stoffelijke' wereld tweeweg te brengen, maar voor dat doel niet hoeven te worden gebruikt. In meer of mindere mate kunnen symbolen van de fysieke werkelijkheid worden losgekoppeld. Woorden zijn geen daden, hoewel ze vaak tot daden leiden. Symbolen kunnen makkelijker worden gemanipuleerd dan materie en ze kunnen worden gemanipuleerd voor de vorming van nieuwe uitingen en uitdrukingen die alleen experimenteel, speels of beeldend zijn. Het staat symbolen vrij ietwat onverantwoord en experimenteel te zijn. Het is dan logisch ons af te vragen of deze abstractie, dit niet-fysieke aspect van taal, ook een kenmerk is van de genen. B.G. Goodwin, een Engelse bioloog, beantwoordt deze vraag bevestigend:

Aristoteles had gelijk, toen hij beweerde dat zulke zaken als vormgevende ideeën, in zeker opzicht verschillend van de gewone fysieke materie, de ingewikkelde en buitengewoon gevarieerde vormgevende processen van de levende natuur moeten leiden. We weten nu dat dit verschil ligt in de symbolische aard van de genetische code en in het opmerkelijk ingewikkelde systeem waarover de cellen beschikken om deze te vertalen. Door genetische symboliek kan levende materie beperkingen opheffen die worden opgelegd door natuurkundige wetten... De symbolische aard van het genetische materiaal levert de vrijwel onuitputtelijke voorraad van mogelijke genetische toestanden voor de evolutie, aangezien symbolen op heel veel verschillende manieren naast elkaar kunnen worden geplaatst op nieuwe 'uitspraken' te leveren, nieuwe, toetsbare hypotheses.

Bepaalde fundamentele overeenkomsten tussen de genen en de taal staan niet ter discussie. Een gen is een segment van de DNA-boodschap en bedraagt bij mensen ongeveer een miljoenste van haar totale lengte. Het bestaat uit een reeks chemische symbolen, ongeveer zoals een zin wordt gemaakt met letters uit het alfabet. Dit alfabet is natuurlijk veel kleiner dan het taalalfabet. Het bestaat uit slechts vier letters: A staat voor adenine, G voor guanine, C voor cytosine en T voor thymine.

Dit systeem staat toevallig dichter bij Shannons binaire code met alleen maar de twee cijfers 0 en 1 dan bij het alfabet, waardoor het gemakkelijker wordt

om de principes van de informatietheorie toe te passen en vast te stellen hoeveel informatie een DNA-molecuul bevat. Dat de informatietheorie daarnaast interessante en zeer algemene dingen zegt over levende wezens, vindt zijn oorzaak in het feit dat ze niet met een veelvoud van alfabetten te maken heeft. Het genetisch alfabet van een muis is hetzelfde als dat van een konijn of olifant. Op zeer kleine uitzonderingen na is de code universeel. Wanneer een virus een cel binnendringt is de verovering gemakkelijk, omdat het virus, hoewel een buitenstaander en buitenlander, hetzelfde symbolensysteem gebruikt als de door hem geïnfecteerde cel. Het virus kan zijn eigen informatie gebruiken om die van de cel te ontkrachten en over te nemen, zodat de cel dan gehoorzaam energie en grondstoffen gaat aanvoeren die het virus nodig heeft om zichzelf te reproduceren. Het is alsof de soldaten van Napoleon voor de poorten van Moskou allemaal vloeiend Russisch gesproken zouden hebben.

De reeksen chemische symbolen, de bases A, G, C en T, geregen langs het DNA-molecuul, zijn mogelijkheden. Eiwitten zijn de verwezenlijking van die mogelijkheden. Genen zijn lineair en eendimensionaal, als woorden op een bladzijde. Eiwitten zijn niet lineair, maar driedimensionaal. Zij zijn de substantie, de werkelijkheid, waarvoor de symbolen staan. Eiwitten zijn heel complex en nogal broos. Ze worden in elkaar gezet door ketens van aminozuren aan elkaar te rijgen volgens de specificatie van de chemische code van het gen in een ingewikkeld proces van kopiëren en vertalen. De twintig verschillende soorten aminozuren kunnen in een enorm aantal verschillende reeksen worden geordend; de ordening van de reeks beslist wat een bepaald eiwit is en welke rol het in het levende organisme zal gaan spelen.

Eiwitten vormen de 'betekenis' van de genetische boodschap. Ze zijn nauw met de werkelijkheid verbonden, omdat ze het wezenlijke materiaal zijn waarvan vlees en botten worden gemaakt, en de darwinistische natuurlijke selectie werkt op eiwitten. Men zou kunnen zeggen dat DNA het woord is en de eiwitten de daad zijn, en daden zijn directer betrokken, zij lopen meer risico en plaatsen zich met meer overgave tegenover het leven dan woorden doen.

De boodschap van het DNA is intrinsiek. Als we het in beeldspraak hebben over de 'ideeën' die het bevat, dan zijn deze aangeboren. Ze komen niet van buitenaf, hoewel externe chemische boodschappen beslist een rol spelen in de ontwikkeling van het levende systeem. Het oorspronkelijke exemplaar van de DNA-boodschap, de levenslange informatievoorraad van het organisme die zijn structuur en groei specificeert, is voor alle veiligheid in de kern geplaatst, in het rustige centrum van de cel, en woont daar in lange, dunne draden die chromosomen worden genoemd. Het onderhoudt geen rechtstreeks verkeer met de buitenwereld. Zijn symboolreeksen staan in verbinding met de chemische fabrieken in het buitenste werkdomein van de cel door een ander soort nucleïnezuurmolecule, het boodschapper-RNA, dat een kopie van de segmenten van de DNA-boodschap daar brengt waar de eiwitten zich verzamelen.

Deze segmenten worden door het vertaalmechanisme van de cel gelezen in kaders van drie symbolen tegelijk, de codonen.

Als de relatie tussen het DNA en de eiwitten een-op-een zou zijn, volkomen direct en eenvoudig, zouden de symbolen niet zo'n interessante rol in de evolutie spelen.

Natuurlijke selectie, als externe, controlerende kracht, aanvaardt of verwierpt eiwitten als ze geschikt respectievelijk ongeschikt zijn, of kan ze soms negeren als ze geen speciale functie hebben. Als de informatie in de DNA-boodschap louter een beschrijving in een andere taal is van de eiwitten zelf, zouden de veranderingen in het DNA in de loop van miljoenen jaren van evolutie overeenkomen met de veranderingen in de eiwitten. Als we de een zouden kennen, zouden we ook de ander kennen. We zouden dan net zo goed de geschiedenis van de substantie, de eiwitten, kunnen bestuderen en de geschiedenis van de symbolen, het DNA, negeren.

Maar zo letterlijk gepredisponeerd, zo banaal, is het systeem niet. Integendeel, het verband tussen het DNA en het eiwit is heel complex en verrijkt, en het bestaat zeker niet uit een eenvoudige lezing van de letterreeksen, codon na codon, van het ene uiteinde van de reeks naar het andere. Daardoor bestaan er meer mogelijkheden dan er ooit kunnen worden gerealiseerd. En de informatietheorie wil van de mogelijkheden net zo veel weten als van de werkelijke gebeurtenissen. Het inzicht dat er niet-eenvoudige verbindingen bestaan tussen de symbolen en de substantie in bepaalde soorten informatiesystemen is in dit boek een overkoepelend thema, hetwelk in de volgende hoofdstukken zal leiden tot nieuwe ideeën over de evolutie in volgende hoofdstukken; het is onmisbaar voor een begrip van de verschillende codes en informatieprocessen in de hersenen.

Bepaalde delen van de DNA-tekst zijn structureel. Met andere woorden, ze brengen een specifiek functioneel produkt in code. Ze zijn de instructies voor de aanmaak van eiwitten, en de boodschap ligt op letterlijk niveau, als een recept voor cake: de boodschap betekent precies wat ze zegt. Maar andere delen van de tekst moeten niet zo letterlijk worden genomen. Die kunnen bestaan uit een soort commentaar op de structurele genen, of hypothetische recepten bevatten voor niet-vervaardigde eiwitten, of programma's voor de bewerking en herordening van de structurele segmenten. Ze kunnen informatie zijn omtrent informatie. In dat geval zou dit een heel verrassende afwijking betekenen van vroegere, eenvoudiger ideeën ten aanzien van het gen.

Evolutie is een ingewikkelder proces dan vroeger werd verondersteld. Toevalsmutaties wijzigen de genetische boodschap door de vervanging van een letter door een andere, zodat de betekenis van een boodschap wordt veranderd. In het geval van de structurele genen kan een mutatie leiden tot de aanmaak van een afwijkend eiwit. Daarentegen zou een mutatie in een 'niet letterlijk' deel van de tekst een totaal andersoortig effect hebben, omdat ze een ver-

andering zou bewerkstelligen in het commentaar of de programma's, wat zou kunnen resulteren in zeer betekenisvolle wijzigingen voor het organisme.

Deze zienswijze op de evolutie zet de symbolen op een zeer invloedrijke plaats in het biologische systeem. Tot voor kort golden de eiwitten als de meest spectaculaire acteurs in het reusachtige theater van het organische leven. Eiwitten zijn acrobaten, die zich in een fantastische verscheidenheid van vormen wringen, waarin elke vorm een eigen betekenis heeft in termen van functie, wat hij is en wat hij doet in de chemie van het organisme. De laatste tijd is het DNA echter meer in het brandpunt van de belangstelling komen te staan dan de eiwitten.

Deze perspectiefwijziging in de biologie lijkt merkwaardig genoeg veel op de verschuiving van nadruk in de moderne linguïstiek, waar de zinnen als oppervlakteverschijnsel alleen maar een deel van de taal vormen, en voor sommigen het minst interessante. Onder de oppervlakte bestaan abstracte principes, waarvan er enkele universeel zijn, en grammatica's die instrumenten zijn om zinnen met een bepaalde structuur te genereren. Zo'n grammatica is intrinsiek en definieert eerder de kennis van een spreker, dan wat hij werkelijk met de taal doet. Dergelijke kennis, die gedeeltelijk verborgen en onbewust is, brengt een enorme hoeveelheid uitgaande informatie voort in de vorm van gesproken zinnen en steunt daarbij op betrekkelijk weinig inkomende informatie in de vorm van wat anderen zeggen. Een generatieve grammatica onderhoudt in de taal wat volgens B.G. Goodwin het DNA-informatiesysteem in de cel onderhoudt, namelijk een vrijwel onuitputtelijk reservoir van mogelijkheden.

Deze benadering van de taal, in de jaren vijftig ontwikkeld door Noam Chomsky aan het MIT, week radicaal af van oude denkwijzen, omdat ze vat kreeg op de vraag waarom taal creatief is, niet alleen voor dichters en broodschrijvers, maar ook voor de gewone taalgebruiker. We hoeven niet zinnen van anderen na te zeggen, hoewel we dat vaak doen. Het punt is dat we altijd zelf nieuwe zinnen kunnen bedenken en dat doen we dan ook spontaan, zelfs in de meest uiteenlopende gesprekken.

De taaltheorie van Chomsky zullen we later gedetailleerder bezien. Nu is het voldoende te zeggen dat de theorie een samenhangende verklaring biedt voor het feit dat taal ons altijd kan verrassen met haar nieuwe, oorspronkelijke uitdrukkingsvormen. Chomsky veronderstelt dat zinnen worden gegenereerd door middel van geïnternaliseerde regels, die steeds weer worden toegepast op een begrensde woordenlijst. Hierdoor is een onbegrensde variatie welgevormde grammaticale zinnen mogelijk, meer dan iemand in zijn leven kan uitspreken. Omdat de mogelijkheden vrijwel onuitputtelijk zijn, is het zinloos te verwachten dat ze allemaal stuk voor stuk kunnen worden beschreven in termen van hun oppervlakteverschijning. Niemand kan alle zinnen van een taal opschrijven, aangezien er in principe altijd meer zinnen kunnen worden toegevoegd. Zo'n onderneming zou nooit ophouden en even zinloos zijn als de poging een lijst op te stellen van alle hele getallen van 1 tot oneindig. De enige manier om de reeks van hele getallen te beschrijven, voor zover dat kan,

is om een lijst op te stellen van de getallen 0 tot en met 9 en de regels te geven voor de onbeperkte vorming van het ene na het andere getal. Enkele regels, toegepast op een paar getallen, genereren de oneindige verzameling van hele getallen. Aldus komt veel uit weinig voort. De enige manier om een taal uitputtend te beschrijven is om de regels en de voorwaarden voor de regels te identificeren en op de inhoud van het woordenboek toe te passen. Dat betekent onder het oppervak van de taal duiken om haar verborgen principes te ontdekken.

Het levende organisme moet het produkt zijn van regels die in de DNA-tekst zijn ingebouwd en steeds weer worden toegepast op dezelfde verzameling symbolen. Ook hier lijkt de natuur veel uit weinig te maken. Het aantal genen op een DNA-molecuul is beperkt, evenals de woordenschat van een taal. Maar door middel van de regels kan een eindeloos rijke verscheidenheid van produkten worden gegenereerd in de vorm van vele verschillende combinaties van eiwitten. De vergelijking met de generatieve grammatica van Chomsky is niet zo bizar als ze lijkt. Sommige biologen ondersteunen haar zelfs als een manier om de scheppende processen in de cel te verklaren.

Misschien is dit het juiste moment om twee fundamentele vragen naast elkaar te plaatsen, de een afkomstig uit de linguïstiek, de ander uit de biologie:

Hoe kan een kind zoiets ingewikkelds als een taal zo snel onder de duim krijgen, louter en alleen door te worden geconfronteerd met willekeurige proeven van volwassen taalgebruik?

Hoe kan zoiets ingewikkelds als een mens betrekkelijk snel ontstaan door willekeurige mutaties van de genen?

Chomsky heeft de eerste vraag al beantwoord, hoewel dat wat hij zegt nog zeer ter discussie staat. Door aangeboren principes zou het een kind worden verhinderd zich foute regels eigen te maken en ertoe worden gebracht de juiste regels te verwerven. Ze verschaffen een kind de aanleg zich een correcte theorie van zijn taal te vormen. Dit houdt in dat het niet helemaal afhankelijk is van de door ouders en onderwijzers gegeven informatie omtrent de taal. Maar Chomsky heeft ook een mening over de tweede vraag. Hij denkt dat natuurlijke selectie, opererend op toevalsmutaties, niet toereikend is ter verklaring van de zo fijn uitgewerkte wezens in de natuur. In een recent gevoerd gesprek zei hij me:

Zodra je begint het werkelijke karakter van de biologische systemen ernstig te nemen zoals ze zich in het rijpende individu ontwikkelen - en de taal is niet meer dan een biologisch systeem - besef je dat ze hoog geconstrueerd zijn en zich ontwikkelen op basis van een heel klein aantal externe voorwaarden, externe input. Dientengevolge moeten ze tot in zeer hoge mate vooraf zijn bepaald. Volgens mij

(en in dit opzicht kan ik wel een beetje meer ketters zijn) levert de natuurlijke selectie op zichzelf bij lange na niet genoeg structuur om dat wat in de evolutie gebeurt te verantwoorden. Dat is zuivere speculatie, zou ik zeggen.

In haar huidige staat is de evolutietheorie een onvolledige verklaring van de oorsprongen en de transformaties van levende organismen.

In landen buiten de Angelsaksische invloedssfeer, waar Darwin minder hoog staat aangeschreven, kunnen eminente figuren soms ronduit zeggen dat de keizer geen kleren aan heeft. Pierre-Paul Grassé, de belangrijkste zoöloog van Frankrijk en een strijdlustige anti-darwinist, bracht daartegen in dat het darwinisme geen verklaring kan geven voor het meest opvallende en voor de hand liggende aspect van de evolutie, namelijk haar vindingrijkheid. Hij schrijft:

Het vermogen om uitvindingen te doen in de levende wereld is immens. Naar onze mening is het niets anders dan het vermogen om informatie door te geven in een bepaalde richting en misschien naar een bepaald doel. We kennen het inwendige mechanisme en de onderliggende bronnen niet: de biologen tasten in het duister.

Een voornaam probleem is dat het kernargument van de darwinistische theorie een cirkelredenering bevat en dus niets verklaart. De uitspraak dat de evolutie de 'survival of the fittest' is, met als definitie van de 'fittest' de soorten met het grootste aantal zich voortplantende nakomelingen, verschilt niet veel van de uitspraak dat wie overleeft, overleeft. Zelfs de moderne variant van het darwinisme, de zogenaamde synthetische theorie, die de evolutie verklaart als de natuurlijke selectie van willekeurige genenmutaties, berust nog steeds op het principe van de 'survival of the fittest'.

De voornaamste hinderpaal om deze argumenten te aanvaarden is dat ze zo'n zware wissel op de willekeur trekken. Het ziet ernaar uit dat de evolutie niet voldoende tijd had om zeer ingewikkelde wezens voort te brengen via een proces waarin het toeval zo'n prominente rol speelt. Murray Eden, een wiskundige aan het MIT, probeerde op een computer de opkomst van de menselijke soort te simuleren door simpele mutatie en selectie. Hij kwam tot de conclusie dat de kans dat het inderdaad zo gebeurt ongeveer gelijk is aan de kans een bibliotheek met duizend boeken bij elkaar te typen door de toetsen van de schrijfmachine in willekeurige volgorde aan te slaan. Sterker nog: de typist zou moeten beginnen met een betekenisdragende zin, die met een paar willekeurige fouten overtikken en vervolgens door toevoeging van letters langer maken, daarna kleinere reeksen anders ordenen, om dan uiteindelijk het resultaat te bekijken of het soms iets zinnigs heeft opgeleverd. Dat wat betreft louter toeval.

Maar als de interne, generatieve principes van het DNA in de beschouwing worden opgenomen, kunnen we nieuwe vragen stellen. Regels bieden beperkingen, maar maken ook een rijke uitdrukking mogelijk. Volkomen willekeurige veranderingen in letter- en woordreeksen in geschreven taal vernietigen

de zin en leiden tot onzin. Maar als de veranderingen willekeurig zijn en toch ook grammaticaal, kunnen interessante nieuwe reeksen het gevolg zijn. In de evolutie is mogelijk een dergelijk proces werkzaam. De grammatica is een antitoevalsinstrument dat toch genoeg ruimte gunt aan het nieuwe. Ze laat het systeem van de taal wezenlijk open en onbegrensd. Als de regels van deze grammatica in de tijd evolueren en veranderen, vinden belangrijke transformaties in haar produkten plaats. Mutatie van een afzonderlijke letter in een DNA-reeks is één ding; mutatie van een regel is iets geheel anders, en het is waarschijnlijk dat de gevolgen daarvan interessant zullen zijn. Een regelverandering zou kunnen leiden tot een innovatie, een uitbarsting van originaliteit, iets dat zo gemakkelijk kan worden verklaard in termen van de taal, maar wat tot nu toe zo moeizaam aannemelijk kon worden gemaakt in termen van de darwinistische evolutie.

9. OVER DE COMPLEXITEITSHINDERNIS

Het is duidelijk dat taal en levende systemen ten minste één aspect gemeen hebben: ze zijn tegelijkertijd complex en stabiel en ze bereiken dat door middel van geïnternaliseerde regels. Ze capituleren niet voor de verstrooiende effecten die door de tweede hoofdwet van de thermodynamica worden voorgeschreven en ze hangen minder af van lot en toeval dan men zou kunnen verwachten. Hun complexiteit regelt zich zelf.

Interessanter is dat deze trekken duidelijk verband houden met de informatietheorie en de thermodynamica. 'Complexiteit', 'het nieuwe', 'verscheidenheid', 'beperkingen van mogelijkheden' zijn termen die men doorlopend tegenkomt in het werk van Shannon en diens opvolgers.

Een van de opmerkelijke feiten over talen is dat ze altijd een rijke structuur hebben, los van hun tijd en plaats in de geschiedenis van de bekende talen. De taal die 'achterlijke' volkeren spreken is niet primitief. Eigenlijk bestaat er geen primitieve taal: alle talen zijn uiterst complex. Evenmin raakt taal in verval, zoals we zouden kunnen veronderstellen. Talen hebben de neiging begrijpelijkheid te bewaren, zodat wat nu op verval kan lijken, dat in werkelijkheid helemaal niet is. Het is de vervanging van de ene soort structuur door een andere. De linguïst Edward Sapir noemde dat proces 'drift'.

Een taal die tot eenvoud of tot ontregeling lijkt af te glijden blijft in werkelijkheid complex, maar wel op een andere manier. Robin Lakoff, een hedendaagse taalkundige, zegt:

Talen hebben een inwendige logica voor wat gaat veranderen en op welke manier. Toen bijvoorbeeld het naamvallensysteem uit het Latijn verdween, begon deze taal zich een vaste woordvolgorde eigen te maken en deze veranderingen gingen onverstoorbaar samen, omdat er nu eenmaal een manier moet zijn om informatie over de structuur te geven; als naamvallen dat niet meer doen, moet de woordvolgorde in de zin die taak op zich nemen. En dit klopt. Zelfs als sprekers met oog voor hun taal zouden kunnen voelen dat onderscheidingen verloren gaan, dan blijkt dat in alle gevallen een andere manier is gevonden om hetzelfde te zeggen en de begrijpelijkheid te bewaren. Er is geen reden waarom een taal in verval zou raken, net zomin als er een reden is waarom de menselijke geest zou degenereren. De conceptuele structuren van de geest zijn verantwoordelijk voor de algemeen geldende vormen van de grammatica en houden feitelijk de taal aan de praat. En die aspecten veranderen niet werkelijk met de tijd. Elke taal heeft ongeveer hetzelfde aantal regels. We kunnen er zelfs redelijk zeker van zijn dat de eigen taal dezelfde hoeveelheid syntaxis heeft en dezelfde hoeveelheid structuur als het proto-Indo-europees.

Het besef van grotendeels universele structuren in de geest die 'de taal aan de praat houden' - met andere woorden, die haar verscheidenheid en complexiteit bewaren - is karakteristiek voor veel hedendaagse denkwijzen in de linguïstiek. We zouden kunnen zeggen dat een antioevalsinstrument in het brein verhindert dat taal entropisch of rijk aan ruis wordt bij het voortschrijden van

de tijd, zodat ze niet volledig hoeft te varen op de toevallige, tijd-afhankelijke kenmerken van de ervaring om haar geordende structuur te handhaven. Lakoff wijst erop dat taal een 'inwendige logica' heeft die het aantal, zo niet de soorten regels redelijk constant houdt. Een aantal moderne biologen beziet de taal van de genen in ongeveer gelijkwaardige termen.

De wetenschap van de thermodynamica werpt nog steeds nieuw licht op de volgende kardinale vraag: waarom raakt de wereld steeds georganiseerder in plaats van eenvoudiger en willekeuriger? Een van de meest vruchtbare denkers op dit terrein is Ilya Prigogine, die wel 'de dichter van de thermodynamica' is genoemd. Prigogine, die in 1977 de Nobelprijs voor scheikunde kreeg, gelooft dat georganiseerde systemen *van nature* voortkomen uit niet-georganiseerde materie, in plaats van toevalstreffers te zijn of van elders in het universum afkomstig. Hij oppert het bestaan van een tot nu toe niet aanvaard beginsel dat levende organismen en zelfs de mens naar toestanden van steeds grotere complexiteit duwt, ongeacht of dat de gewenste richting is.

Prigogine zegt:

Dit is volkomen nieuw; iets dat een nieuwe wetenschappelijke intuïtie oplevert over de aard van ons universum. Het staat helemaal haaks op het klassieke thermodynamische gezichtspunt dat informatie altijd moet ontaarden. Het is, zo u wilt, een uitermate optimistische visie.

De neiging voorwaarts te bewegen naar een hoog georganiseerde toestand, in plaats van terug naar een eenvoudiger staat, is een eigenschap van open systemen, die materie en energie met hun omgeving uitwisselen. Open systemen gedragen zich niet op dezelfde wijze als gesloten systemen, die in de fysische chemie lange tijd de belangrijkste onderwerpen van studie zijn geweest. Onder bepaalde omstandigheden bereiken open systemen een stabiele toestand, ver van evenwicht of maximale entropie, en handhaven deze. Ze zijn hoogst 'onwaarschijnlijk' en hoogst complex. En wat meer is: zo'n stabiele toestand is te bereiken vanuit verschillende startpunten, ondanks tussentijdse onderbrekingen. Deze toestand noemt men 'equifinaal'.

Prigogine ziet deze open thermodynamische systemen in een toestand van wanorde beginnen. Ze worden dan onstabiel en komen vervolgens in een stadium waarin energie zich ophoopt en structuur zich ontwikkelt. Dit noemt hij het scheppen van orde door fluctuaties. Een fluctuatie is een toevalskwestie, een afwijking van het gemiddelde gedrag dat doorgaans wordt gladgestreken, maar onder speciale omstandigheden groter wordt en een eigen plaats gaat innemen. Fluctuaties komen altijd voor, maar sommige worden groter, terwijl andere op den duur weer worden gladgestreken. Als fluctuaties een kritieke omvang bereiken, stabiliseren ze in een 'equifinale' toestand. Het scheppen van structuur is afhankelijk van de vraag hoe ver het systeem van het evenwicht verwijderd is en dat hangt weer af van de snelheid en de mate van

uitwisseling van materie en energie met de omgeving. De afstand tot het evenwicht zal groot zijn als er veel uitwisselingen plaatsvinden en erg klein of nihil als dat er maar weinig zijn. In beide gevallen gelden dezelfde natuurkundige wetten, maar wel dicht bij het evenwicht. Prigogine zegt dat de wetten leiden tot 'ondergang of destructie', hoewel ze, verder van het evenwicht af, processen van opbouw en organisatie kunnen worden. Hij voegt hieraan toe dat in het laatste geval de waarschijnlijkheidstheorie niet meer opgaat. Niet-evenwicht kan daarom in open systemen een bron van orde zijn, ongeacht of deze systemen nu chemisch of biologisch zijn, en een fundamentele verwantschap onthullen tussen leven en niet-leven. In beide gevallen blijft de complexiteit behouden.

Het hele complexiteitsvraagstuk is bij onderzoek door moderne theoretici verrassend genuanceerd gebleken. Complexiteit is niet alleen een kwestie van een systeem met een heleboel onderdelen die langs niet-triviale weg met elkaar zijn verbonden. In plaats daarvan blijkt complexiteit een bijzondere, op zichzelf staande eigenschap te zijn die complexe systemen kwalitatief onderscheidt van eenvoudige en ze in staat stelt dingen te doen en te zijn die we misschien niet hadden verwacht. Chomsky neemt aan dat de beheersing van de menselijke taal, die tot de meest gecompliceerde structuren in het universum moet behoren, in de evolutie uitsluitend tijdens een bepaald stadium van *biologische* complexiteit opkomt. Met andere woorden, taalbeheersing verschijnt dan en alleen dan wanneer de evolutie heeft geleid tot een organisme dat zó complex is als de mens. Verder zegt Chomsky:

Dit plaatst de bioloog voor een probleem, want als dit zo is, is het een voorbeeld van een waarachtige 'opkomst': het optreden van een kwalitatief afwijkend fenomeen in een bepaald stadium van organisatie.

'Opkomst' is geen populair woord in de moderne wetenschap. Maar het is niet volstrekt taboe en wordt gewoonlijk met complexiteit geassocieerd. Kunstenaars voelen zich daarentegen met dit begrip zeer vertrouwd. T.S. Eliot aarzelde niet een gedicht te definiëren als iets opkomends, iets nieuws, dat verklaring in termen van oorzaak en gevolg tart, zelfs wanneer alle noodzakelijke informatie over de oorzaken bekend lijkt te zijn. Wetenschappers gaan wat omzichtiger te werk. De Amerikaanse natuurkundige John Wheeler heeft de aandacht gevestigd op de manier waarop volledig nieuwe concepten ontstaan als een systeem uit een zeer groot aantal delen wordt gevormd, zoals het geval is met temperatuur, druk en entropie, die eigenschappen zijn van thermodynamische systemen die bestaan uit een ontzaglijk aantal microscopische deeltjes. Ilya Prigogine merkt op dat bij bepaalde chemische reacties de moleculen hun gedrag niet alleen aanpassen aan de plaatselijke omstandigheden, maar ook aan het grotere moederorganisme, 'dat in complexiteit toeneemt en naar iets heel anders toegroeit dan louter de som van zijn delen'.

Met het opkomstprobleem is een van de grote namen uit de wetenschap van de twintigste eeuw verbonden. John von Neumann, zoon van een redelijk

welvarende bankier in Boedapest, was een wonderkind. Als jongeman deed hij belangrijke ontdekkingen inzake de grondslagen van wiskunde en logica. Von Neumann was tot buitengewone geestelijke huzarenstukjes in staat: hij kon hele hoofdstukken van boeken uit zijn hoofd opzeggen en nieuwe wiskundige concepten ontwikkelen in de verstrooiende atmosfeer van een nachtclub of op de achterbank van een taxi. Zijn collega's zeiden min of meer schertsend dat het brein van von Neumann zelf een orgaan in opkomst was en van een ander soort complexiteit dan dat van gewone stervelingen.

Von Neumann was in de twintig toen hij naar Princeton ging. Op het moment dat Amerikaanse wetenschappers de eerste atoombom begonnen te ontwikkelen, was zijn overvloedige kennis van de schokgolventheorie van onschatbare waarde voor het Manhattan Project. Op het bomlaboratorium in Los Alamos, in de staat New Mexico, was hij vooral verantwoordelijk voor het bedenken van de implosiemethode om de nucleaire brandstof te ontsteken, een methode waarbij een aanzienlijke hoeveelheid brandstof gelijkmatig en van alle kanten tegelijk wordt samengeperst. Implosie bespoedigde de ontwikkeling van de bom met ten minste één jaar. Ze moest binnen een miljoenste seconde nauwkeurig zijn, anders deugde ze niet. De theorie stond bol van afschuwelijke wiskundige moeilijkheden, tot vreugde van von Neumann. Om de noodzakelijke myriaden berekeningen te kunnen hanteren, gaf Robert Oppenheimer, de directeur van Los Alamos, von Neumann opdracht de meest verfijnde rekenmachines te bestellen die hij kon vinden. IBM, fabrikant van de rekenmachines die in een kritiek stadium van de oorlog hadden geholpen de Japanse code te breken, leverde ponskaartmachines, tot vermaak van de andere wetenschappers, die er 's avonds op speelden. Von Neumann raakte al gauw gefascineerd door de logische structuur van deze apparaten en begon ideeën te ontwikkelen over dit complexiteitskenmerk dat computers gemeen hebben met het menselijk brein. Hij werkte nog steeds aan dit probleem toen hij in 1957 op 53-jarige leeftijd aan kanker overleed.

Von Neumann ging ervan uit dat een theorie van complexe systemen heel sterk zou verschillen van een van eenvoudige systemen. Destijds bestond er voor complexe systemen geen theorie. Het hele begrip 'hoge complexiteit' was slecht gedefinieerd en vaag en hield voor iedereen wat anders in. Von Neumann maakte een begin met het definiëren van het begrip complexiteit door de karakteristieken te beschrijven waarvan hij redelijk zeker was. Als basis daartoe stelde hij dat complexiteit bij het meer algemene onderwerp informatie hoorde en bij wat hij 'quasithermodynamische overwegingen' noemde. Hij zei dat complexiteit 'kritische en paradoxale eigenschappen' vertoonde, eigenschappen als entropie, die alleen in niet-eenvoudige systemen te vinden zijn.

Bovendien kunnen we, teneinde complexe systemen als een grote computer of een levend organisme te begrijpen, niet de gewone formele logica gebruiken bij gebeurtenissen die zeker wel of zeker niet zullen voorvallen. Er is een

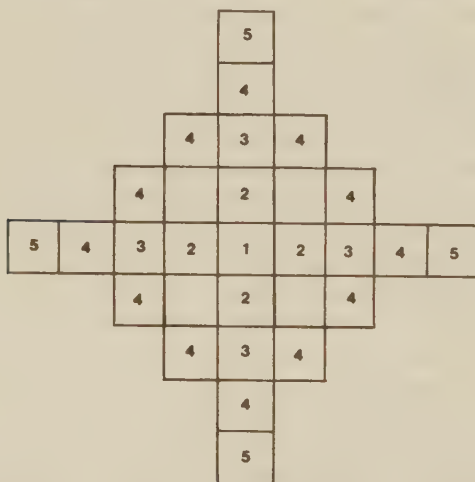
waarschijnlijkheidslogica nodig die uitspraak doet over de waarschijnlijkheid of onwaarschijnlijkheid inzake het plaatsvinden van bepaalde gebeurtenissen. De reden hiervoor is dat computers en levende organismen betrouwbaar en als één geheel moeten functioneren, zelfs als niet verwacht kan worden dat hun samenstellende delen altijd volmaakt zullen werken. De delen functioneren alleen met een zekere waarschijnlijkheid correct en deze waarschijnlijkheidsfactor dient in de logica van het systeem te worden ingebouwd. Het doel is zekerheid te hebben dat de kans dat het hele systeem in elkaar klappt redelijk klein is, zelfs als afzonderlijke delen waarschijnlijk slecht functioneren. Bij het complexer worden van systemen wordt deze statistische eigenschap van totale betrouwbaarheid tegenover de betrouwbaarheid van de afzonderlijke delen steeds belangrijker.

Een andere eigenschap van bepaalde zeer complexe systemen is dat ze zichzelf dusdanig kunnen reproducen dat hun nakomelingen niet aan complexiteit verliezen en vaak daaraan kunnen winnen. Levende wezens vermenigvuldigen zich niet alleen, ze doen meer: met het verstrijken van de tijd ontwikkelen eenvoudige organismen zich tot meer samengestelde. De amoëbe leidde uiteindelijk tot de mens. De voor de hand liggende vraag is: hoe konden eenvoudige voorouders in de tekst van hun DNA genoeg informatie opslaan om verfijndere afstammelingen te produceren? Machines in een fabriek gedragen zich niet op deze opmerkelijke manier. Om een eenvoudig technisch onderdeel te vervaardigen is een behoorlijk ingewikkelde machine nodig. Als een mechanische ouder een nakomeling voortbrengt, wordt de complexiteit in plaats van verhoogd juist drastisch omlaag gebracht. Machinaal gereedschap kan geen machine maken die even verfijnd als het gereedschap zelf is, laat staan verfijnder. Als een robot een tweede robot moet maken, moet hij niet alleen een beschrijving van die robot bevatten, maar ook een verzameling regels om hem te kunnen produceren.

‘Hoe kunnen machines zichzelf voortplanten?’ vroeg koningin Christina van Zweden aan haar leermeester, Descartes, nadat hij haar had verteld dat het menselijk lichaam, met uitzondering van de ziel, kan worden verklaard in mechanische termen. Een goede vraag. Drie eeuwen nadat de koningin deze vraag stelde kwam John von Neumann met een antwoord. Hij opperde het denkbeeld dat er in levende organismen en zelfs in machines een ‘complexiteitshindernis’ bestaat. Voorbij deze hindernis, waar systemen bestaan van zeer hoge complexiteit, gaan volkomen nieuwe principes een rol spelen. Het is mogelijk, zei von Neumann, dat een machine een verder ontwikkelde machine dan zijzelf kan vervaardigen als deze eenmaal een bepaald organisatieniveau heeft bereikt - als de machine eenmaal de complexiteitshindernis heeft doorbroken. Complexiteit is een doorslaggevende eigenschap. Onder het kritieke niveau verslechtert het vermogen tot synthese, wat aanleiding is voor steeds eenvoudiger systemen. Maar boven dat niveau wordt de synthese van verder ontwikkelde systemen onder de juiste omstandigheden explosief.

Voor dit boek is de belangrijkste eigenschap van complexiteit het feit dat ze wordt mogelijk gemaakt door redundantie en wordt voortgebracht door regels in de vorm van opgeslagen informatie. Het vermogen van een klein aantal

vaste regels om een *onvoorspelbare* hoeveelheid complexiteit voort te brengen is erg opvallend. Sommige ingenieuze spelletjes van computerdeskundigen illustreren dit vermogen op enigszins speelse wijze. Zij weerspiegelen op een eigenaardige en verrassende manier de groeipatronen van levende organismen. Stanislaus Ulam, wiskundige en boezemvriend van von Neumann, werkte indertijd eveneens aan het Manhattan-Project; hij bedacht een paar intrigerende varianten van deze spelletjes op een denkbeeldig vel papier van onbepaalde afmetingen. In een van deze varianten is het mogelijk een patroon van vierkanten bijna als een organisme te laten groeien door nieuwe vierkanten aan de bestaande toe te voegen volgens een verzameling vooraf bepaalde regels. Een van deze spelregels kan zijn dat een nieuw vierkant alleen kan worden toegevoegd als het aan niet meer dan één reeds aanwezig vierkant raakt (door daarmee een zijde gemeen te hebben; de hoekpunten van aangrenzende vierkanten tellen dus niet mee). Het uiteindelijke resultaat is een symmetrisch patroon dat er als volgt uitziet (de cijfers in de vierkanten geven de volgorde van toevoeging - of de generaties van groei - aan):



We kunnen de patronen in de ruimte laten bewegen door toevoeging van de regel dat vierkanten, die ouder dan een bepaald aantal generaties zijn, moeten worden uitgeveegd. Soms splitsen deze patronen zich op in afzonderlijke delen die qua vorm lijken op de 'ouders'. Ulam noemt dit proces zelfreproductie. Zijn computers simuleerden de groei van nageslacht door toepassing van een nieuwe regel: wanneer twee nakomelingen dezelfde plek proberen te bezetten, wordt geen nieuw vierkant toegevoegd. Deze regel leidt tot een strijd om te overleven tussen de nakomelingen; in sommige gevallen sterven beide uit.

Ulam werd getroffen door de complexiteit en de rijkdom van de patronen die geformeerd konden worden door dezelfde paar regels steeds toe te passen

op een zo simpele en saaie figuur als een vierkant of een kubus. Er ontstonden aantrekkelijke en koralijnen vormen waarvan de evolutie moeilijk te voorspellen was. Maar ofschoon de uiterlijke verschijning van deze figuren niet helemaal kan worden beschreven, is dat wel het geval met de regels die deze figuren voortbrachten.

John Conway, een Engelse wiskundige met als specialisme de getallentheorie, ontwikkelde deze computerpatronen tot wat hij het 'Levensspel' noemt; het wordt gespeeld met gekleurde schijven op een dambord van onbeperkte grootte. De regels van het Levensspel zijn zo in elkaar gezet dat het gedrag van de patronen onvoorspelbaar is. Een schijf mag op het bord blijven als op haar hoekpunten contact is met twee of drie andere schijven. Dan overleeft ze en is derhalve 'fit' in evolutionair opzicht. Heeft een schijf echter minder dan twee of meer dan drie burens, dan is ze niet 'fit' en moet van het bord worden gehaald. Het spel maakt doodgaan dus mogelijk, maar biedt ook vernieuwing: elk leeg vierkant dat contact heeft met precies drie bezette vierkanten, is volgens de regels een geboortecel; bij de volgende zet wordt daarop een nieuwe schijf geplaatst.

Wat deze spelen zo interessant maakt is hun vermogen de speler te verrassen. De regels zijn simpel, maar hun voortbrengselen zijn hoogst complex, zodat ze wiskundigen die een poging tot analyseren wagen ernstige moeilijkheden opleveren. Martin Gardner, die Conway's Levensspel via *Scientific American* (oktober 1970) bij het publiek introduceerde, liet zien dat patronen van schijven in hun gereguleerde verandering exotische en soms prachtige, maar altijd onverwachte vormen aannemen. Asymmetrische figuren hebben de neiging symmetrisch te worden en deze symmetrie blijft niet alleen bewaard, maar wordt zelfs verrijkt. De meeste figuren vertonen gedurende lange tijd een opmerkelijk stabiel gedrag of oscilleren volgens een vast patroon. Tijdens sommige spelletjes werden wonderlijke verschijnselen waargenomen. Zo baarden groepen van vijf schijven na elke dertig zetten een nieuwe, identieke groep. Als een van deze pasgeboren groepen in contact kwam met een bepaalde andere figuur, een pentadekathlon bestaande uit twaalf schijven, at deze laatste de eerste groep op. Twee pentadekathlons konden een figuur van vijf schijven onbeperkt heen en weer kaatsen. Een ander schijvenpatroon ging elke zeven zetten op z'n kop staan. Een lange, dunne formatie kon naar believen worden uitgerekt en een 'Cheshire kat' verdween elke zesde zet, met achterlating van slechts een rijtje schijven in de vorm van een grijns. Met de zevende zet verdween ook die grijns en bleef alleen de afdruk van een poot achter.

Enkele van deze spelen zijn lachwekkende varianten van biologische processen in de wereld der levenden. Een schijf die in regelmatige, stabiele figuren werd geplaatst, gedroeg zich als een virus in een gastheercel. Als de schijf op bepaalde vierkanten werd gezet, begon deze het hele patroon overhoop te gooien. Toch schakelde de gastheercel het virus uit en herstelde zich in twee zetten nadat de schijf de hoeken van vier blokken van schijven had aangeraakt.

Voor zulke eenvoudige verzamelingen van regels zijn deze uitkomsten bijzonder opmerkelijk. Martin Gardner denkt dat het Levensspel eigenlijk veel meer dan een spel is. Het kan misschien de effecten nabootsen van regels die in de materiestructuur zijn ingebouwd. Deze regels kunnen zelfreproducerende, bewegende automaten hebben voortgebracht in de oersoep van aminozuren, dus vóór er leven op aarde was.

Aldus begint een gemeenschappelijk thema op te doemen uit deze onderzoeken. Regels vormen de schakel tussen de nieuwe linguïstiek en de nieuwe biologie. Een bescheiden aantal regels, steeds weer toegepast op een beperkte verzameling objecten, leidt tot verscheidenheid, het nieuwe en het verrassende. We kunnen weliswaar alle regels beschrijven, maar niet noodzakelijkerwijs al hun voortbrengselen - niet de verzameling van alle hele getallen, niet iedere zin van een taal, niet alle organismen die in de evolutie zouden kunnen ontstaan. Ulam vertelde me dat Chomsky's theorie van de generatieve grammatica het uitgangspunt was van zijn eigen werk met computerspelen en toch gelooft hij tegelijkertijd dat deze spelen kunnen leiden tot een nieuw begrip over de manier waarop levende systemen zich ontwikkelen, ongeveer zoals gokkers in de zeventiende eeuw wiskundigen met hun vragen ertoe brachten een waarschijnlijkheidstheorie in elkaar te zetten.

Uit het Levensspel komt nog een belangrijke gedachte naar voren. Dat is het besef van onvolledigheid, een beroemd struikelblok van de twintigste-eeuwse wetenschap en logica. Kan een systeem dat door axioma's of regels wordt bestuurd ooit volledig zijn en zo niet, waarom dan niet? Ulam ziet computermodellen van organische processen als een aspect van deze fundamentele vraag. Hij koppelt ze aan de complexiteitstheorie van von Neumann en ook aan een van de meest revolutionaire ontdekkingen in de logica, het Onvolledigheidstheorema van Kurt Gödel.

De in 1906 in Tsjechoslowakije geboren Gödel was vanaf 1938 tot aan zijn dood in 1978 permanent lid van het Institute for Advanced Study in Princeton. Op vijftientwintjarige leeftijd publiceerde hij in Wenen een artikel dat zo ingrijpend was en de grondslagen van de logica zodanig overhoop haalde, dat de volledige implicaties ervan jarenlang niet werden ontwikkeld. Pas in de jaren zeventig raakte het theorema in de mode en werd bij het publiek bekend. Gödels artikel is niet alleen van toepassing op de mathematische logica, maar slaat ook op veel ruimere vraagstukken over de volledigheid van alle formele kennissystemen. Het gaat over het eeuwige sleutelprobleem: Wat kan de menselijke geest weten? Volgens Gödel zijn er niet te vermijden beperkingen aan kennis. Boven een bepaald niveau van complexiteit heeft een logisch systeem intrinsieke limieten, als dat systeem tenminste consistent is. Er zullen altijd ware uitspraken bestaan waarvan niet kan worden aangetoond dat ze waar zijn en evenmin bewijzen dat ze fout zijn, althans binnen de grenzen van het systeem en met gebruik van zijn axioma's en regels. Door buiten het

oorspronkelijke systeem te treden en het met nieuwe axioma's en regels uit te breiden, kan de uitspraak misschien wel worden bewezen, maar dan zullen er in dit verruimde systeem weer nieuwe uitspraken zijn die niet zonder een volgende uitbreiding kunnen worden aangetoond. Volmaakte volledigheid wordt nooit bereikt.

Wil Gödels theorema toepasbaar zijn, dan moet het systeem over voldoende complexiteit beschikken, maar deze eis is niet onoverkomelijk. Gewone rekenkunde is al complex genoeg om in aanmerking te komen. Deze bevat een eindeloos aantal ware uitspraken die niet kunnen worden afgeleid door gebruik te maken van een gesloten verzameling deductieve regels. Met andere woorden, de regels waarmee de waarheden van de rekenkunde worden opgebouwd zijn niet volledig gedefinieerd en kunnen dat ook nooit worden.

Gödels ontdekking betekent dat logica, wiskunde en misschien ook andere soorten kennis rijker zijn dan ooit valt te beschrijven of volledig te definiëren. Dit is de essentie van de nieuwe benadering in de linguïstiek die met Chomsky begon: taal zal altijd in staat zijn de lezer of luisteraar te verrassen met haar frisheid en met haar vermogen naar het niveau van nieuwe ideeën te groeien wanneer op de taal een beroep als uitdrukkingsmogelijkheid wordt gedaan. De constellaties, voortgebracht door het Levensspel, zijn onverwacht. In de sub-atomaire wereld is de materie zelf in die zin onvoorspelbaar, dat de waarnemer met zijn vergelijkingen niet precies kan zeggen in welke toestand de materie op een toekomstig tijdstip zal verkeren. Hij moet de materie een nieuwe vraag voorleggen, maar daardoor verstoort hij oncontroleerbaar het systeem dat hij observeert en wijzigt hij de toestand waarin het verkeert.*

Gödels theorema veroorzaakte zo ongeveer een schandaal onder logici en geïnteresseerden in kennistheorieën. De waarheden van de rekenkunde, en van wellicht een heleboel andere zaken, werden de onderzoekers voorgesteld als een onontdekt werelddeel. En het onderzoek gaat eeuwig door, omdat het werelddeel geen grenzen heeft. De definitieve kaart zal nooit worden getekend. Toch is deze voorstelling allerminst ongewoon voor de werken die ontspruiten uit de verbeelding: toneelstukken, romans en gedichten zijn alle in essentie onvoltooid.

* Aage Petersen heeft ons eraan herinnerd dat in de klassieke mechanica het woord 'natuur' werd gebruikt in de bijzondere betekenis van informatie die nog niet in het wiskundige formalisme is vervat. Maar deze informatie was alleen nodig voor het waarnemen van de beginvoorwaarden van het systeem. Door precies te weten wat een planeet doet, is het met behulp van Newtons bewegingsvergelijkingen mogelijk erachter te komen wat de planeet op elk toekomstig tijdstip zal doen. Deze vergelijkingen vegen niet de bestaande informatie over de planeet uit en brengen evenmin nieuwe informatie voort, aangezien al het wezenlijke reeds vanaf het begin bekend was. Ze 'vertalen' de informatie alleen naar de toekomst of naar het verleden. In het geval van materie op subatomair niveau krijgt 'natuur' echter een heel andere betekenis. Het resultaat van een experiment verschaft informatie welke niet besloten ligt in de begincondities, die alleen de waarschijnlijkheid specificeren dat een bepaalde gebeurtenis wordt waargenomen. Over de uitkomst van het experiment valt niets te zeggen, maar de 'natuur' spreekt zich niettemin wel uit.

Aan geen enkel gedicht boven een bepaald 'complexiteitsniveau' valt de laatste druppel betekenis te ontwringen, zelfs niet door generaties critici. T.S. Eliots waarschuwing tegen een te groot vertrouwen in een 'oorzakelijke' verklaring van poëzie leek heel sterk op de manier waarop moderne quantumfysici oorzaak-en-gevolgverklaringen van het gedrag van materie op het subatomaire niveau verwerpen. Eliot stoorde zich aan de verschijning van twee biografieën van Wordsworth, die beide externe oorzaken aanvaardden voor de mindere kwaliteit van diens latere werk. Een van deze biografieën probeerde deze verandering te verklaren uit de verhouding van de dichter met Annette Vallon. De andere suggereerde dat het opdrogen van Wordsworths inspiratiebron was te wijten aan zijn gefrustreerde liefde voor zijn zuster, Dorothy. Eliot vond beide hypothesen onvoldoende, omdat ze de wezenlijke aard van de krachten die poëzie voortbrengen niet verklaren. Eliot schreef:

Ik voor mij kan alleen maar zeggen dat kennis van de drijfveren die een gedicht doen opwellen niet noodzakelijkerwijs helpt bij het begrijpen van het gedicht: te veel informatie over de oorsprong van het gedicht kan zelfs mijn contact ermee verbreken. [...] Ik ben zelfs bereid te zeggen dat alle Poëzie met een hoofdletter iets in zich draagt dat onverklaarbaar moet blijven, hoe volledig onze kennis van de dichter ook mag zijn, en dát weegt het zwaarste. Wanneer het gedicht af is, is er iets nieuws gebeurd, iets dat niet helemaal te verklaren is door *alles wat eraan voorafging*.

Geen enkele afgeronde, keurig verpakte en allesomvattende theorie omtrent de werkelijkheid zal ooit volmaakt zijn. De aard van de taal, de vormen van de logica, de dualiteit van de materie onder het waarneembare oppervlak, het vermogen van regels om nieuwe structuren voort te brengen, de grenzen aan kennis en het bijzondere karakter van complexe tegenover eenvoudige systemen leiden alle tot deze slotsom. In dit opzicht ontmoeten wetenschap en kunst, filosofie en politiek, geschiedenis en psychologie elkaar op gemeenschappelijk terrein. De scheidingswanden tussen de culturen storten in elkaar door het inzicht dat ze alle onvolledig zijn en dat ook altijd zullen blijven; dat geen enkele discipline of denkrichting een monopolie op de waarheid heeft. Als gevolg van de ontdekkingen in de afgelopen vijftig jaar in wat bekend stond als de exacte wetenschappen, is het moeilijker geworden de waarheid te definiëren. Deze ontdekkingen hebben de exacte wetenschappen rijker gemaakt, maar niet uitgesproken exacter, en ze op hun grondvesten doen schudden.

10. IETS REDELIJK SUBTIELS

Een van de meest inzichtrijke pogingen om het centrum van de belangstelling in de evolutie te verschuiven van substantie naar symbolen werd rond het begin van de jaren zeventig ondernomen door de biofysica dr. Lila Gatlin. Haar ideeën leken toen tamelijk ketters, maar in de daarop volgende jaren hebben de vorderingen van andere molecuulair-biologen haar argumenten kracht bijgezet.

Dr. Gatlins benadering is radicaal ten opzichte van de op haar terrein gangbare opvattingen, omdat ze ervan uitgaat dat de biologie veel rijker zou moeten zijn aan machtige theoretische concepten, zoals die in de natuurkunde worden gevonden. In dat opzicht beschouwt ook Chomsky de linguïstiek als bijzonder zwak. De meeste biologen neigen ertoe zichzelf te zien als de beschrijvers van de natuur en als de verzamelaars van feiten die tot een goed experiment zullen leiden. Maar als DNA een informatieproces is en er een informatietheorie bestaat, is het redelijk te veronderstellen dat wetenschappers tenminste kunnen beginnen een theorie van levende organismen, in de volle betekenis van het woord, te schetsen. Dat is precies wat Gatlin doet.

Gatlin gaat uit van de vooronderstelling dat er communicatie plaatsvindt als de DNA-symbolen in eiwitten worden vertaald. Dat is meer dan zo maar een metafoor. Gatlin gebruikt het woord in dezelfde betekenis als Claude Shannon in 1948 in zijn artikelen over de communicatiewiskunde.

Omdat Shannons werk hoogst abstract is, en daarom bijzonder krachtig en algemeen, kan het worden toegepast op elk soort informatiesysteem waarin boodschappen van een bron naar een ontvanger worden verzonden. En aangezien in het levende systeem informatie wordt overgebracht van DNA naar eiwit langs een kanaal van biochemische processen in de cel, kan deze informatie aan Shannons theorama's en vergelijkingen worden onderworpen.

DNA wordt gezien als de bron van de boodschap; de eiwitten bevinden zich aan de ontvangstzijde van het 'communicatiekanaal'. Al meteen op dat punt zijn de leerstellingen van de klassieke evolutie en de principes van de informatietheorie met elkaar in strijd, omdat de informatietheorie groot belang hecht aan de bron en aan de manier waarop de informatie daar is gestructureerd en de evolutie voornamelijk geïnteresseerd is in de output van het kanaal, de eiwitten.

In Shannons theorie is de kern van geslaagde communicatie dat de boodschap juist gecodeerd moet zijn voor ze wordt verstuurd, zodat deze haar bestemming bereikt precies zoals ze de zender verliet, intact en vrij van fouten, veroorzaakt door de verstorende effecten van ruis. Dit betekent dat een bepaalde mate van redundantie bij de bron in de boodschap moet worden ingebouwd. Alleen op deze manier kan de afzender er zeker van zijn dat zijn boodschap de andere kant onverminkt en in haar oorspronkelijke, geordende toestand bereikt. Shannon bewees dat er codes bestaan die, hoewel oog in oog

met algemene wanorde, de orde handhaven. Deze codes garanderen een transmissie van boodschappen die net zo volmaakt en foutloos is als de codeerder wenst, vooropgezet dat de ideale code wordt gebruikt. Shannons opmerkelijke theorema laat zien dat boodschappen niet in het ongerede hoeven te geraken, zelfs als ze worden blootgesteld aan de vermengende uitwerking van de tweede hoofdwet van de thermodynamica.

In de organische evolutie is natuurlijke selectie een anti-toevalsdrager die orde oplegt aan toevallige veranderingen en mutaties van levende vormen. De informatietheorie wekt echter de indruk dat een ander soort anti-toevalsinstrument *bij de bron* in de genetische boodschap kan worden ingebouwd.

In Gatlins nieuwe type van natuurlijke selectie, de tweede-theoremaselectie, wordt 'fit' in heel andere en meer abstracte termen gedefinieerd dan in de klassieke evolutietheorie. Hier is fitheid niet een kwestie van sterke lichamen en rijke voortplanting, maar van genetische informatie, die volgens Shannons principes is gecodeerd.

Gatlin veronderstelt dat de codes die de zogenaamde hogere organismen mogelijk maakten redundant genoeg waren om een foutloze transmissie langs het kanaal van DNA naar eiwit te verzekeren, maar dat die tegelijkertijd een entropie bezaten, in de door Shannon gebruikte betekenis van 'een hoeveelheid potentiële informatie', die hoog genoeg was om een grote verscheidenheid van mogelijke boodschappen voort te brengen. Men bedenke dat in de informatietheorie de entropie een maat is van een aantal boodschappen dat verzonden had kunnen worden, maar dat niet verzonden werd. Als een werkelijke boodschap uit een groot aantal mogelijke boodschappen wordt gekozen, lost deze een heleboel onzekerheid op en draagt daarom een grote hoeveelheid informatie over. Bij het juiste gebruik van codes wordt de brede scala van 'betekenissen', die genetische boodschappen kunnen uitdrukken, niet al te zeer gehinderd door de noodzaak om bij de transmissie ervan fouten tegen te gaan. Aldus Gatlins kijk op de zaak.

Gatlin voert aan dat in de loop van de evolutie bepaalde organismen DNA-boodschappen verwierven die op deze optimale manier worden gecodeerd, wat ze een zeer geslaagde balans gaf tussen precisie en verscheidenheid, een eigenschap die menselijke talen ook vertonen. Deze winnende schepsels waren de gewervelde dieren, enorm vernieuwende en veelzijdige levensvormen, wier verschijning leidde tot een versnelling van de evolutie.

Gewervelde dieren waren de dragers van het nieuwe. Ze deden meer dan zich aanpassen. Ze veranderden de bouw en de chemische huishouding van hun lichaam radicaler en evolueerden sneller dan de andere dieren en oefenden een indrukwekkende overheersing uit op hun omgeving. De eerste gewervelde dieren die uit fossiel bewijsmateriaal volledig bekend geworden zijn, de ostracodermen, waren log en langzaam. Deze op de bodem levende vissen floereerden zo'n 350 miljoen jaren geleden. Ze waren van kop tot staart bedekt met een zwaar, waterdicht pantser. Het gewicht van hun uitwendige skelet hield ze verankerd aan de bodem van zoetwatermeren en riviermondingen. Maar later begonnen ze opvallend en ingrijpend te veranderen. Uitsteeksels

van het taaie pantser ontwikkelden zich tot vinnenparen. In sommige verscheen voor het eerst in de evolutie echt been en ontwikkelde zich zacht kraakbeen. Het pantser rondom de kop werd getransformeerd tot schedel met openingen voor de zintuigen reuk, gezicht en gehoor. Er kwam ruimte om een brein te bergen. Primitieve kieuwspleten veranderden in kaken en handig geplaatste pantserplaten in tanden. In één, thans uitgestorven, vissoort met tanden ontwikkelden benige ondersteuning van de vinnen zich tot ledematen; het toneel was gereed voor de opkomst van de amfibieën.

In de geschiedenis van de gewervelde dieren toont de natuur zich op haar vindingrijkst. Overzien we de immense tijdsspanne waarin ze zich ontwikkelden, dan lijken de gewervelde dieren sprongsgewijs naar het nieuwe te zijn gegaan. Zelfs als ze niet naar een nieuw habitat migreerden, werden ze complexer; de overgangsstadia verliepen niet gladjes en gestaag. Welk soort foutencorrigerende redundantie bezat het DNA van deze evolutionaire prijsdieren, de gewervelden? Deze redundantie heeft ze de vrijheid gelaten om creatief te zijn en duidelijk anders te worden, want hun opkomst werd niet alleen mogelijk gemaakt door veranderingen in de vorm van een gemeenschappelijk skelet, maar vooral door het ontwikkelen van volkomen nieuwe lichaamsdelen en organen. En toch heeft deze redundantie hun ook de beperkingen moeten opleggen die nodig zijn om de genetische boodschappen onvervormd te houden.

De vier (chemische) letters van het genetische alfabet worden in de verschillende biologische soorten en individuen van dezelfde soort in uiteenlopende volgorde gerangschikt. Deze reeksen zijn duidelijk niet willekeurig, net zomin als bijvoorbeeld de woorden in een zin of de stenen van een huis willekeurig gegroepeerd zijn. Elke zin heeft een bepaalde structuur. In de zin komen niet alle letters even vaak voor. Wat belangrijker is: de waarschijnlijkheid dat een of meer letters op een bepaalde plaats in de reeks zullen verschijnen, kan worden beïnvloed door de voorafgaande letter of letters. Met andere woorden, een letter is niet noodzakelijkerwijs onafhankelijk van de eraan voorafgaande in de keten. Evenals in de taal, treden deze redundantieregels op als beperkingen: zij beknotten het aantal manieren waarop de boodschappenbron symbolen tot reeksen kan groeperen. Zonder die regels zou elke reeks letters mogelijk zijn en zou taal volslagen persoonlijk en willekeurig worden, waarin het iedereen vrijstond letters in elke gewenste volgorde aan elkaar te rijgen, zodat ze niet langer betekenissen zouden overbrengen.

Redundantie vergroot natuurlijk de waarschijnlijkheid dat bepaalde letters wel en andere niet zullen verschijnen. Op deze manier verlaagt ze de entropie van de boodschappenbron door inperkingen van de verscheidenheid van mogelijke boodschappen waaruit de werkelijke boodschap kan worden gekozen. Redundantie verlaagt echter op meer dan één manier de entropie - en dat is het belangrijkste punt.

Een idee van de werking van deze procedure is te vinden in een variatie op de hypothese dat als een aap onbeperkt de tijd had en een eindeloze voorraad typemachines, hij door stom toeval het verzamelde werk van Shakespeare zou kunnen typen. Het hele idee is nogal idioot, omdat het taal vanuit een puur mechanistisch gezichtspunt benadert. Zelfs Shakespeare zou niet het werk van Shakespeare schrijven als een moderne wetenschapper hem aan de typemachine zou zetten. Het grapje is een schilderachtige manier om te illustreren dat de tweede hoofdwet van de thermodynamica, omdat deze op toeval is gebaseerd, niet absoluut zeker en onontkoombaar is, maar alleen verpletterend waarschijnlijk. In principe is het niet verboden dat het water in een fluitketel op het fornuis gaat bevriezen in plaats van koken, maar die kans is zo fantastisch klein dat ze niet de moeite van het bespreken waard is. Hetzelfde geldt voor de waarschijnlijkheid dat apen schrijvers van elizabethaanse rijmloze verzen worden.

William Bennett jr., hoogleraar in de technische wetenschappen aan de Yale-universiteit, heeft met computers berekend dat als een biljoen apen tien willekeurige aanslagen per seconde zouden doen, het langer dan een biljoen keer de huidige leeftijd van het universum zou duren om alleen maar de zin 'To be, or not to be: that is the question' te produceren. Maar Bennett heeft ook laten zien dat door toepassing van bepaalde uiterst eenvoudige waarschijnlijkheidsregels, waardoor de toetsen niet volledig willekeurig worden aangeslagen, denkbeeldige apen in enkele minuten stukjes kunnen produceren die een opmerkelijke gelijkenis vertonen met versregels uit Shakespeares toneelstukken. Hij voorzag zijn computers van zesentwintig letters van het alfabet, een spatie- en een apostrofteken. Toen schreef Bennett, met het derde bedrijf van *Hamlet* als zijn statistisch model, een zodanig programma dat bepaalde letters gemiddeld vaker verschenen dan andere, net als in het stuk waarin de vier meest voorkomende letters de e, o, t en a zijn en de vier minst gebruikte de j, n, q en z. Met deze instructies schreven de computeringen nog steeds wartaal, maar nu zat er wat meer structuur in:

NCRDEERH HMFOMRETW OVRCA OSRIE IEOBOTOGIM
NUDSEEWU...

Vervolgens programmeerde Bennett wat statistische regels over het waarschijnlijke optreden van bepaalde letters aan het begin en einde van woorden, en over de meest gebruikte letterparen, zoals th, he, qu en ex. Dit verbeterde de tekst van de apen een beetje, hoewel het niveau nog niet echt aan dat van de 'Bard' kon tippen:

ANED AVECA AMEREND TIN NF MEP FOR'T SESILORK
TITIPOFELON HERIOSHIT MY ACT...

In deze tweede programmeerfase verscheen een groot aantal weinig fijngevoelige woorden en krachttermen, wat Bennett deed vermoeden dat éénletter-

grepenge obsceniteiten in de gewone taal tot de meest waarschijnlijke letterreeksen behoren. Vloeken heeft een lage informatieinhoud! Toen Bennett vervolgens de computer programmeerde om groepen van drie letters te laten meetellen, waarin de waarschijnlijkheid van één letter wordt beïnvloed door de eraan voorafgaande letters, was de helft van de woorden correct Engels en was het percentage vuilbekkerij toegenomen. Op het vierde programmaniveau met groepen van vier letters was nog maar tien procent van de geproduceerde woorden wartaal en vertoonde een zin, de vrucht van een computerprogramma dat de hele nacht gedraaid had, een spookachtige gelijkenis met Hamlets monoloog:

TO DEA NOW NAT TO BE WILL AND THEM BE DOES DOESORNS
CALAWROUTOULD.

Een computeraap die was geprogrammeerd om de statistische structuur van lettergroepen te reproduceren zoals die verschijnen in Ernest Hemingway's roman *A Farewell to Arms*, deed meteen een oneerbaar voorstel.

Bennetts vier programmaniveaus, die resulteerden in een steeds dichtere benadering van Shakespeares rijmloze verzen, voegden in voortschrijdende stadia redundantie toe aan de boodschappenbron door inperking van de vrijheid van de letters van het alfabet om met gelijke waarschijnlijkheid te verschijnen. De redundantie verlaagde in elk stadium de entropie van de boodschappenbron, maar niet altijd op dezelfde manier. Op het eerste niveau tikten de denkbeeldige apen volstrekt naar willekeur en was de kans voor alle toetsen even groot, zodat de entropie of keuzevrijheid maximaal was. Dit betekende dat de onzekerheid van de lezer ook maximaal was, omdat hij geen flauw idee had welke letter de volgende in de reeks zou zijn. Maar naarmate de complexiteit van de programma's toenam, werd die keuzevrijheid steeds geringer. Op het tweede niveau verschenen sommige letters vaker dan andere, zodat het leek alsof de apen lukraak hadden getypt op schrijfmachines met een groot aantal i's, iets minder t's en zo afnemend langs de schaal waarop de letters naar hun gebruiksfrequentie in het derde bedrijf van *Hamlet* zijn opgenomen.

In de volgende programmeringsfasen werd de waarschijnlijkheid van een enkele letter niet op zich beschouwd, maar werd beïnvloed door de één, twee of drie letters die eraan voorafgingen. Het is duidelijk dat de waarschijnlijkheid dat na de drie letters DOE de letter S volgt erg groot was. Bennetts computer was niet krachtig genoeg om groepen van vijf letters aan te kunnen, maar naarmate de apentekst de ladder der redundantie verder besteege, kregen de woorden steeds meer structuur en zagen er vertrouwd uit, zelfs als zij betekenisloos waren. Ze werden gemakkelijker voorspelbaar. De elektronische apen hadden een aanzienlijke keuzevrijheid in het aanslaan van de toetsen, maar volledig vrij waren ze niet, omdat het programma de waarschijnlijkheden ongelijk had gemaakt. Dit doet denken aan het verschil tussen een thermodynamisch systeem in evenwicht, waarin alle moleculaire configuraties even

waarschijnlijk zijn, en een systeem dat ver van zijn evenwichtstoestand af ligt en waarin bepaalde configuraties waarschijnlijker zijn dan andere.

Gatlin wijst erop dat we, in een geval als dat van Bennetts apen, spreken over twee verschillende soorten redundantie. Beide verlagen de entropie, maar niet op dezelfde manier, en dat verschil is cruciaal. Het eerste type redundantie, dat zij D^1 noemt, is de statistische regel dat in een stuk tekst sommige letters naar alle waarschijnlijkheid gemiddeld vaker verschijnen dan andere. D^1 , die context-onafhankelijk is, meet de mate waarin een reeks van symbolen die door een boodschappenbron is gegenereerd, afwijkt van de volledig willekeurige toestand, waarin alle symbolen even waarschijnlijk kunnen verschijnen. Het tweede type redundantie, D^2 , die context-gevoelig is, meet de mate waarin de afzonderlijke symbolen afwijken van een toestand van volmaakte onderlinge onafhankelijkheid, waarin geen context bestaat. Deze twee redundantietypen zijn van toepassing zowel op een reeks chemische basen, uitgestrekt langs een DNA-molecule, als op de letters en de woorden van een taal.

Het toenemen van D^1 , de context-onafhankelijke redundantie, is, zo laat Gatlin zien, een beveiliging tegen fouten, omdat deze de reeks voorspelbaar maakt. Als er op een tekstpagina meer x-en dan e's staan, is er duidelijk iets mis. Dan is de statistische structuur van de taal geschonden. Niettemin is context-onafhankelijke redundantie duur, omdat deze bij een te grote toename strenge grenzen stelt aan de verscheidenheid van de boodschappen die kunnen worden verzonden. De prijs voor precisie wordt extravagant. Het is alsof een zetter te weinig exemplaren van bepaalde letters in zijn letterkast heeft en te veel van andere letters. Als de zetter miljoenen a's en t's heeft, maar nauwelijks een van de vierentwintig andere letters van het alfabet, is 'at' zo ongeveer het enige woord dat hij kan zetten, miljoenen keren achter elkaar.

De context-gevoelige D^2 maakt de symbolenvolgorde eveneens voorspelbaarder, omdat deze een verhouding tussen de letters tot stand brengt. Daardoor is het vaak mogelijk op grond van de reeds verschenen letters te raden wat de volgende in de reeks zullen zijn. Toch is context-gevoelige redundantie niet zo duur als context-onafhankelijke. Ze kan in een redelijke mate toenemen zonder de boodschappenbron al te zeer te onderdrukken. Ze beperkt de boodschap niet tot slechts enkele letters, zoals de context-onafhankelijke redundantie. Ze staat een grotere verscheidenheid toe en beheerst tegelijkertijd fouten. Het Engels is rijker aan context-gevoelige dan aan context-onafhankelijke redundantie, wat de rijke verscheidenheid van deze taal verklaart, gekoppeld aan haar voortreffelijke leesbaarheid, zelfs als ze door zetfouten en vergissingen is verminkt. De taal kan altijd nieuwe ideeën overbrengen, maar dan wel binnen het kader van vertrouwde regels voor vorm en betekenis.

Bennett programmeerde context-onafhankelijke redundantie tijdens een vroeg stadium van zijn computerexperiment en hield deze constant. Hij moest

echter doorgaan met het vergroten van de context-gevoelige redundantie tot de grenzen van zijn apparatuur, voordat de computer zinnen begon te schrijven die in de verte op zinnig Engels leken, zij het nog lang niet op shakespeareaanse versregels. Zelfs op het hoogste programmaniveau, toen de waarschijnlijkheid van een enkele letter afhing van de drie eraan voorafgaande letters, bleef er te veel willekeur in de boodschappenbron over.

Volgens Gatlin zouden lagere organismen meer context-onafhankelijke redundantie in het informatiesysteem van hun genen kunnen hebben dan context-gevoelige. Hierdoor wordt verzekerd dat de signalen die van het DNA via het kanaal naar het eiwit worden verzonden weinig fouten vertonen, maar wordt het systeem tegelijk beperkt tot een zeer enge scala van eenvoudige boodschappen, als een boek waarin steeds hetzelfde kleine aantal woorden wordt herhaald. Het DNA van primitieve schepsels mag dan een zodanig hoge context-onafhankelijke redundantie hebben dat het vrij van fouten is, maar het heeft dit alleen ten koste van de vrijheid van expressie kunnen bereiken.

Een dergelijke strategie is niet erg verstandig en probeert niet de mogelijkheden van Shannons tweede theorema uit te buiten. Dit theorema belooft een optimale combinatie van verscheidenheid en precisie, mits de boodschap op precies de juiste manier aan de bron redundant wordt gemaakt. Fagen, bijvoorbeeld, kleine virusdeeltjes die bacteriecellen infecteren, kunnen zichzelf in de gastheer cel tientallen malen per uur met zo'n verbijsterende precisie reproduceren, dat Leo Szilard, toen hij in het Cold Spring Harbor laboratorium op Long Island er voor het eerst een in actie zag, naar buiten liep en pas na een tijdje op de veranda van het gastenverblijf te hebben geijdsbeerd zijn kalmte had hervonden. Zo'n foutloze reproductie kan worden toegeschreven aan het feit dat fagen bijzonder kwistig omspringen met context-onafhankelijke redundantie in hun DNA, zoals het geval is bij bacteriën en ongewervelde dieren. Het DNA van gewervelde dieren, aldus Gatlin, lijkt echter in zoverre meer op een menselijke taal, dat het rijker is aan context-gevoelige dan aan context-onafhankelijke redundantie en bovendien een hoeveelheid redundantie bezit die erg hoog is.

Gatlin beschouwt de context-gevoelige redundantie, die de afwijking in onafhankelijkheid van de symbolen in de DNA-boodschap meet, als een evolutionaire index, die de scheidslijn markeert tussen schepsels mét en zónder ruggegraat. Het is een soort informatie-barrière die, eenmaal doorbroken, leidt tot toenemende biologische complexiteit. Als dit klopt, is evolutie niet zo maar een kwestie van willekeurige veranderingen in eiwitten, die op 'geschiktheid' zijn geselecteerd door louter externe factoren als milieu, bevolkingsclusters, voedselaanvoer en competitie binnen en tussen de verschillende soorten. Er zit een interne, abstracte kant aan, die opgevat moet worden in termen van de communicatie- en informatiewetten. De omgeving speelt nog steeds een belangrijke rol in het overleven van de 'geschikten', maar deze worden op een minder externe manier gedefinieerd en geselecteerd door meer dan één soort anti-toevalsinstrument. Als eenmaal de juiste balans tussen te

veel en te weinig vrijheid van expressie voor de boodschappenbron van het DNA is bereikt, verbreedt zich de scala van keuzen die voor organismen openstaat. Het was die extra vrijheid, beveiligd door redundantie, die het leven voorwaarts bewoog naar meer complexe vormen. Zoals de westerse beschaving na de uitvinding van de boekdrukkunst een versnelling ervoer, zo kan de evolutie een voorwaartse impuls van zichzelf hebben ontvangen.

Variatie en de beheersing van variatie zijn het wezen van de moderne computerrevolutie, maar vormen ook het hart van het informatiesysteem van de genen. Gatlin schrijft:

De gewervelde dieren en hun voorouders waren de eerste levende organismen die de stabilisatie van D^1 bereikten en zo het fundament legden voor het formuleren van een genetische taal. Vervolgens lieten ze D^2 groter worden, terwijl D^1 alleen maar mocht toenemen van nul tot de optimale grenzen, vastgesteld door de genetische code. Daardoor vergrootten ze de betrouwbaarheid van de genetische boodschap zonder groot verlies aan variatie in boodschappen. Ze bereikten een afname in de foutkans zonder daar een al te hoge prijs voor te betalen. Een informatietheoreticus zou dit herkennen als de toepassing van Shannons tweede theorema.

Het Gatlin-scenario gaat als volgt: als informatie dragende moleculen zichzelf reproduceren, wordt de overlevingscompetitie waarschijnlijk gewonnen door die met het grootste aantal kopieën en het minste aantal fouten. Het is mogelijk dat in de eerste, primitieve voorlopers van leven op aarde korte reeksen chemische symbolen tot overleven neigden, omdat ze een hoge redundantie hadden. Vervolgens kon dit eenvoudiger informatie-systeem met zijn hoge niveau van precisie complexer worden gemaakt door de reeks langer te maken. Zoals in alle lokale systemen neemt de entropie toe volgens de tweede hoofdwet van de thermodynamica. De redundantie die de entropie verlaagt moet bij gevolg afnemen. De scala van onzekerheden verbreedt zich, het 'vocabulaire' wordt rijker en de verscheidenheid neemt toe. Context-gevoelige redundantie bereikt een minimumwaarde.

Gatlin gelooft dat op dat punt het leven in de gebruikelijke betekenis van het woord begon. Tot dit moment volgde de evolutie de thermodynamische tijdpijl, weg van de toenemende entropie. Maar toen de context-gevoelige redundantie toenam, waardoor de DNA-boodschappen immuun werden voor fouten terwijl de boodschappen zelf steeds langer werden, deed het principe van Shannons tweede theorema zijn intrede. Levende systemen die tot dan toe de thermodynamische pijl hadden gevolgd, veranderden van koers. De evolutie was niet langer willekeurig, maar ging een specifieke richting uit, niet op weg naar maximale entropie, maar naar complexiteit en een hoge mate van orde. Het DNA van de gewervelde dieren vond een middenweg van entropiewaarden, tussen de zeer onzekere en de zeer voorspelbare in, een weg waarlangs vergissingen weliswaar worden beheerst maar de beperkingen op de verscheidenheid van boodschappen niet te belemmerend werken.

We staan hier aan het begin van een theorie van evolutie als informatie-proces. Zelfs als sommige ideeën van Gatlin speculatief zijn, dwingen ze ons

toch de interne structuur - we kunnen bijna zeggen de linguïstische structuur - van de DNA-tekst eerder te beschouwen als de hoofdrolspeler dan als een figurant in de opkomst van levende schepselen. In een inmiddels beroemd artikel, dat in 1969 werd gepubliceerd, schreven de Amerikaanse biologen Jack Lester King en Thomas Jukes: "We kunnen het er niet mee eens zijn [...] dat het DNA de passieve drager is van de evolutionaire boodschap. Evolutionaire verandering wordt het DNA niet van buitenaf opgelegd: het komt van binnenuit. Natuurlijke selectie is eerder redacteur dan opsteller van de genetische boodschap."

Nog maar kort geleden was het een axioma in de biologie dat de genen van alle organismen, eenvoudige én ver-ontwikkelde, zich op eenzelfde manier gedragen. Maar recent onderzoek laat zien dat dit gezichtspunt onjuist is. Ten minste enkele DNA-boodschappen in mensen, dieren en hogere planten worden niet gedecodeerd en geactiveerd zoals dat gebeurt in primitievere organismen als bacteriën. Op enkele zeer onbeduidende uitzonderingen na staan alle boodschappen geschreven in dezelfde vier-lettercode. Maar de regels voor het omzetten van symbolen naar substantie kunnen verschillen: zelfs in heel eenvoudige organismen kan informatie op verrassend subtiele en vernuftige manieren worden opgeslagen.

Onder veel publicitair klaroengeschal presteerden in 1977 sir Frederick Sanger en zijn medewerkers aan het moleculair-biologisch laboratorium van de British Medical Research Council het huzarenstuk van het decoderen van een volledige biochemische boodschap. Het succes van het team, dat alom werd toegejuicht, was het ontcijferen van de complete genetische tekst van een van de kleinste bacterie-virussen, ØX174. Een mysterieuze waas had dit bijzondere virus tot dan toe omringd: het scheen niet genoeg informatie te bevatten voor de aanmaak van de negen verschillende soorten eiwitten die in feite worden geproduceerd als het virus een gezonde cel infecteert. De reeks van 5375 chemische symbolen op het DNA van het virus was te kort om de volledige verzameling celinstructies geheel te ontcijferen. Als het DNA moet worden gezien als een kookboek met recepten voor de aanmaak van eiwitten, dan leken er aan het kookboek van dit virus een paar hoofdstukken te ontbreken. Met het ontcijferen van de totale reeks van symbolen werd het mysterie echter ten langen leste ontsluit. Er was weliswaar genoeg informatie in het virus-DNA, maar deze was op een onverwacht doortrapte manier opgeslagen. De woorden van de tekst overlaptten elkaar, zodat meer boodschappen in een kleine ruimte konden worden geperst.

Als het celmechanisme de DNA-boodschap in eiwit omzet, dient het te weten wanneer het moet beginnen en ophouden. Elke boodschap om een eiwit aan te maken begint met een codon, een drietal chemische symbolen bestaande uit de 'letters' ATG. Het stopsignaal voor deze aanmaak wordt door een van de drie codonen TAA, TGA, of TAG gegeven. Dit leek allemaal erg duidelijk totdat de tekst van ØX174 nauwkeurig werd onderzocht. Toen bleek dat een enkele symbolenreeks informatie bevatte om twee zeer verschillende soorten eiwitten te maken, afhankelijk van de manier waarop de reeks werd gele-

zen. Begon het lezen bij de eerste letter, dan gaf het de reeks een volkomen andere betekenis dan die welke werd verkregen als het lezen bij de tweede letter begon. De genen waren niet netjes gescheiden door een duidelijk begin en een duidelijk gemarkeerd einde. Een TAA 'stop'-signaal kon een TGA overlappen. Wordt het leesraam een letter verschoven, dan krijgt de hele reeks codonen een volledig andere betekenis in termen van door deze symbolen omschreven eiwitten. De betekenis van de boodschap wordt veranderd. Het virus-DNA gebruikte telkens dezelfde symbolen om vele verschillende codonen te vormen, ongeveer zoals horizontaal en verticaal in een kruiswoordraadsel door elkaar heen lopen en elkaars letters gebruiken, zodat meer informatie in een kleine ruimte kan worden geperst.

De ontdekking dat dit minuscule virus informatie opslaat door middel van een DNA-tekst die zo uitgekiend is samengesteld als ware het om de vindrijkheid van een meester op het gebied van anagrammen op de proef te stellen, kwam als een openbaring. Men had gedacht dat in de genetische code precisie en accuratesse te belangrijk waren om slimme woordspelletjes te riskeren teneinde de complexiteit van het organisme te doen toenemen. De evolutie zou er toch zeker op staan dat de boodschappen zó duidelijk waren dat ze uitsluitend ruimte toelieten voor één en niet meer dan één interpretatie? Maar kennelijk is de structuur van het DNA, zelfs op zo'n eenvoudig niveau, van meer belang. Ze kan niet worden begrepen als louter een aaneenschakeling van symbolen die een eenvoudige één-op-één relatie hebben met het eindprodukt; dit is evenmin het geval met taal. Het bestaan van regels om woorden in zinnen om te zetten of DNA-symbolen in eiwitten, ziet erop toe dat dit verband verre van simpel is en maakt de produkten uiterst gevarieerd en verfijnd. Zoals Sir Frederick Sanger al opmerkte in een van de klassieke understate-ments in de biologie: 'Er lijkt iets redelijk subtiels aan het werk te zijn'.

DEEL III

Het coderen van taal en het coderen van leven

11. ALGORITMEN EN EVOLUTIE

In moderne taaltheorieën moet de term 'regel' nogal precies worden gedefinieerd. Het woord wordt niet in dezelfde betekenis gebruikt als een fatsoensregel, welke slechts een conventie is die mensen verbiedt datgene te doen waarin ze anders vrij zouden zijn geweest. Taalkundige regels daarentegen hebben het openen van nieuwe gebieden van activiteit tot gevolg. Ze beschikken over een immens vermogen om zinnen voort te brengen. Feitelijk zijn ze zo machtig, dat ze door het opleggen van voorwaarden moeten worden ingetoomd en Chomsky gelooft dat deze voorwaarden deel uitmaken van de structuur van de universele grammatica, die alle menselijke talen gemeen hebben.

Zoals de schaakregels het schaakspel definiëren, definiëren taalregels het taalspel, dat zonder deze regels niet zou bestaan. Ze zijn geen nauw omschreven mechanismen van oorzaak en gevolg - het ene vloeit simpel uit het andere voort - maar laten een systeem wezenlijk open en onvolledig, waardoor het altijd tot iets nieuws in staat is. Omgangsregels sluiten een systeem af door het uniform en voorspelbaar te houden, tenzij de regels worden veranderd. Taalregels zijn indirect en kunnen steeds opnieuw worden toegepast op dezelfde verzameling letters en woorden en maken een open universum van nieuwe zinnen mogelijk dat gebaseerd is op het gesloten universum van het woordenboek.

Een onbegrensd systeem dat door dit soort regels wordt bestuurd, bevat meer informatie dan we zouden verwachten als we uitsluitend naar zijn samenstellende delen kijken. Dit is een manier om de paradoxale vraag te benaderen hoe een zo ver ontwikkelde structuur als het menselijke brein kan ontstaan uit de biologische informatie van een stel chromosomen. Hier lijkt het gevolg, het brein, exorbitant veel groter te zijn dan de oorzaak, de reeksen symbolen op het DNA-molecule. Het antwoord op de paradox is dat de symbolen van de tekst niet één voor één langs de hele DNA-keten worden afgelezen, maar worden uitgedrukt in verschillende combinaties door middel van 'regels', die herhaaldelijk op symbolen worden toegepast, zoals taalregels op zinsdelen. De informatie-inhoud is niet door het tellen van codonen te bepalen, net zomin als de informatie-inhoud van een taal kan worden vastgesteld door de woorden in het woordenboek te tellen.

Taal wordt *gegenereerd* en soms ook *geïmiteerd* - dat dient met de grootste nadruk gesteld. Een kind slaat niet alleen afschriften van gehoorde zinnen één voor één op in de dossierkasten van zijn geheugen. Doordat taal door middel van geïnternaliseerde regels wordt gegenereerd, kan het kind creatief zijn en is het niet volkomen afhankelijk van externe informatie. Als het DNA niet de 'passieve drager van de evolutionaire boodschap' is, dan is taal zeker niet de passieve imitator van wat andere mensen zeggen.

Met de publikatie van zijn *Syntactic Structures* in 1957 onthulde Chomsky de dwaasheid van de veronderstelling dat het Engels, of welke andere spreektaal ook, een systeem is met een eindig aantal toestanden. Een dergelijke grammatica is de meest simpele en beperkte van alle grammatica's. Ze is als een machine die begint met het uitschrijven van het eerste woord van een zin en vervolgens woord na woord toevoegt tot het eind van de zin is bereikt, waarna de machine stopt. Zo'n grammatica heeft geen geheugen: ze kan niet terugzien op voorafgaande zinsdelen bij haar gang van het ene naar het andere einde. Dus kan de grammatica niet een zin uitbreiden door er een bijzin in op te nemen, wat in de meeste talen heel gebruikelijk is. Een dergelijke grammatica is niet bestand tegen een regel die voorschrijft dat de woordkeus in een zinsdeel moet slaan op de woordkeus in een eerder deel. Om zo'n machine net zo taalvaardig als de mens te maken, zou het noodzakelijk zijn een afzonderlijke regel op te stellen voor elke denkbare grammaticale in die taal: een grammaticus zou lang voor het voleindigen van zijn opdracht overleden zijn.

Vóór Chomsky hadden taalkundigen al gewerkt met grammatica's met een eindig aantal toestanden, misschien zelfs zonder zich dit te realiseren. Chomsky's betekenis lag in het feit dat hij nieuwe principes introduceerde die veel machtiger waren dan die van het model met het eindig aantal toestanden. Zijn theorie van de transformationele grammatica was gebaseerd op een systeem van geïnternaliseerde regels die een oneindig aantal grammaticale zinnen konden genereren.

Een voorbeeld uit de logica kan het vermogen van regels illustreren om nieuwe informatie voort te brengen, net zoals de transformationele grammatica nieuwe zinnen genereert. De informatietheoreticus Michael Watanabe wees erop dat als de menselijke geest een verwerker van informatie is, hij volgens de wet van de toenemende entropie juist in staat is informatie kwijt te raken en niet te verwerven. Toch is het duidelijk dat de geest informatie schept. De wereld wordt ermee overspoeld. Watanabe denkt een uitweg uit deze kennelijke tegenstrijdigheid te hebben gevonden door in overweging te nemen dat de informatie, vastgelegd in een wet of regel, veel omvangrijker is dan de informatie die nodig is om enkele gebeurtenissen te omschrijven. In het beroemde syllogisme

Alle mensen zijn sterfelijk
Socrates is een mens
Socrates is dus sterfelijk

vertelt de eerste zin (een soort regel over de menselijke aard) ons veel meer dan de tweede. De eerste reduceert de onzekerheid omtrent de ganse mensheid gedurende haar hele geschiedenis, terwijl de tweede slechts de onzekerheid omtrent een enkel individu vermindert.

Als de uitdrukkingsregels voor DNA eenmaal worden ontdekt, zullen ze waarschijnlijk lijken op dezelfde creatieve principes van transformationele grammatica en niet op de alledaagse bewerkingen van de oude grammatica's

met een eindig aantal toestanden. Zoals we al hebben gezien is een van de belangrijkste ontdekkingen van de moderne biologie dat niet alle symboolreeksen in de DNA-tekst codes zijn voor de rechtstreekse vorming van eiwit. Men vermoedt dat sommige van deze reeksen de werking reguleren van genen die wel direct tot de vorming van eiwit opdracht geven en dat de eerstgenoemde reeksen hele batterijen van eiwitgenererende genen op verschillende manieren en tijdstippen aan- en uitzetten, zoals een dirigent tijdens het ten gehore brengen van een symfonie verschillende orkestgroepen aan bod laat komen. Uit de ingewikkelde manier waarop embryo's volgens een uiterst gevoelig tijdschema van ontwikkeling volwassen worden, wordt duidelijk dat er een erg complex systeem van beheersing en regels - een genetische grammatica - moet bestaan.

In wiskundig jargon uitgedrukt, gedragen sommige delen van de DNA-boodschap zich meer als een algoritme dan als een recept uit een kookboek of een band uit een bandrecorder. Het woord 'algoritme' is interessant. Het is afgeleid van de naam van de wiskundige en astronoom Al-Khowarizmi, een leerling van Al-Mamun, die weer de zoon was van de negende-eeuwse moslimheerser Harun Al-Rashid (de kalief uit de verhalen van *Duizend-en-één-Nacht*). Al-Khowarizmi, lid van het Huis van Wijsheid, een academie van wetenschappelijk denken in Bagdad, ontwierp een aantal abstracte procedurele regels om wiskundige uitdrukkingen te reorganiseren. Hij schreef de verhandeling *Al-jabr w' al mugabala* (=Vervoer en verwijdering) over het overbrengen van termen van het ene lid van een vergelijking naar het andere en het wegvallen van gelijke termen aan weerskanten. Tegenwoordig is het systeem bekend als 'algebra'.

In de moderne betekenis van het woord is een algoritme een speciale methode om symbolen te manipuleren en in het bijzonder een methode die een enkele basisprocedure steeds opnieuw toepast. Een algoritme zet bepaalde hoeveelheden om in andere hoeveelheden en hanteert daarbij een eindig aantal transformatieregels. Taalregels horen bijvoorbeeld tot dit soort regels. In het geval van DNA kunnen de regels bewerkstelligen dat verzamelingen genen steeds weer worden gereproduceerd en op verschillende specifieke manieren in eiwit omgezet. Het algoritme zou dan een soort programma zijn dat bepaalde combinaties van genen instrueert om op specifieke tijdstippen aan of uit te gaan en zou als informatie in de DNA-tekst zijn opgeslagen. Het zou analoog kunnen zijn aan de grammatica en de syntaxis van het Nederlands. Kennis van de woorden van de Nederlandse taal stelt de spreker niet in staat zinnen te vormen, net zomin als kennis van de genen die rechtstreeks opdracht tot productie van een eiwit geven - de 'structurele genen' - een bioloog in staat stelt te begrijpen waarom deze genen op zo'n ingewikkelde manier in eiwitten worden omgezet. Deze genen lijken te worden aan- en uitgeschakeld met de virtuositeit van een pianist die volgens het algoritme van de partituur steeds

dezelfde groep toetsen op de piano aanslaat in een duizelingwekkende verscheidenheid van verschillende combinaties.

Een algoritme is vaak een meer compacte uitdrukingsvorm dan een letterlijke beschrijving van het produkt waarvoor het een instructie is. Het enige dat nodig is om de getallenreeks 12121212 voort te brengen, is het uitvaardigen van de instructie 'schrijf vijf maal de cijfers 12 op'. De reeks kan tot een onbepaalde lengte worden uitgebreid door het algoritme te formuleren als 'schrijf duizend maal de cijfers 12 op' of 'schrijf een miljoen maal de cijfers 12 op'. Als de getallenreeks een minder simpel patroon volgt, zal het algoritme verder uitgewerkt moeten zijn. Om de reeks 121122123124 te specificeren zouden de instructies ongeveer als volgt moeten worden geformuleerd: 'schrijf 12 vier keer op, voeg elke keer een cijfer toe, te beginnen met 1, en doorloop verder de reeks van gehele getallen tot en met 4.' Dit is een lang algoritme dat echter na simpele wijziging in de beantwoording opdracht kan geven voor de constructie van een reeks van miljoenen cijfers lang.

Murray Eden, de wiskundige van het MIT die de menselijke evolutie met gebruikmaking van de klassieke krachten van natuurlijke selectie op willekeurige genmutaties op de computer probeerde te simuleren, vond dat er zelfs bij benadering niet genoeg tijd voor de evolutie geweest kan zijn om mensen voort te brengen. Hij concludeerde dat algoritmen beperkingen moeten opleggen aan de toevalsmutaties in de symbolen van de DNA-boodschap, aangezien de beperkingen van natuurlijke selectie alleen niet machtig genoeg lijken. Eden wees erop dat geen enkele taal willekeurige veranderingen in de lettervolgorde in een zin kan toestaan, omdat de betekenis dan vernietigd zou worden. Veranderingen dienen 'syntactisch legitiem' te zijn en de structuurregels te volgen. Net zoals een menselijke taal in de loop van de tijd niet vervalt maar nieuwe structuursoorten verwerft en daarbij de begripelijkheid bewaart, hebben de genen, zo vermoedde Eden, een soort grammatica die stabiel blijft, niettegenstaande mogelijke veranderingen. En dit gebeurt ondanks de willekeurige mutaties en de selectiedruk van de evolutie.

In de logica moet een belangrijk onderscheid gemaakt worden tussen uitspraken en 'meta-uitspraken', die informatie over uitspraken bevatten en erbuiten staan. Dit onderscheid moet men goed in de gaten houden om niet het risico te lopen in tegenstrijdigheden en paradoxen te vervallen. Het is onmiddellijk duidelijk dat elke verandering in meta-uitspraken, elke herschrijving van het algoritme, in de loop van de evolutie een veel drastischer effect op het organisme zou hebben dan het geval zijn bij mutaties van het een of andere symbool in die delen van de DNA-boodschap die rechtstreeks de genetische code voor eiwitten bepalen. Er valt niets verhelderends over DNA te zeggen als het als louter passief wordt beschouwd, als een door het DNA gespecificeerd organisme. Het is zinvoller DNA op te vatten als een dynamische entiteit en als iets dat 'meta-uitspraken' doet - uitspraken over uitspraken - die op een hoger logisch niveau liggen en niet met het verstrijken van de tijd veranderen, zoals met de meeste andersoortige uitspraken gebeurt.

Een zeer verhelderend onderzoek, uitgevoerd door dr. Edmund Lin en zijn medewerkers op de medische faculteit van de Harvard-universiteit, illustreert het vermogen van algoritmen om zelfs in eenvoudige schepselen belangrijke evolutionaire ontwikkelingen voort te brengen. In dit experiment werd enkele miljarden bacteriën hun voeding van koolstofverbindingen onthouden. Onder normale omstandigheden zetten de bacteriën dergelijke verbindingen om door middel van enzymen, waarvan de samenstellingen keurig in hun chemische structuur pasten. Maar omwille van experimentele doeleinden kregen de bacteriën een heel ander soort koolstofverbinding, xylitol geheten, die niet door de natuur was samengesteld. Deze verbinding was ze totaal vreemd en konden ze dan ook niet omzetten.

In het DNA van de bacteriën is echter informatie aanwezig voor het produceren van het enzym ribitol-dehydrogenase. Dit enzym kan snel een ander soort verbinding, ribitol, omzetten die een chemische structuur vergelijkbaar met xylitol heeft. Hoewel het oppervlak van het enzym zich zo heeft ontwikkeld dat het precies past in de structuur van ribitol, kan het enzym zich ook aan xylitol hechten, zij het met een lagere affiniteit. En eenmaal geconfronteerd met xylitol kan het enzym dit in een andere voedingsbron omzetten, die de bacteriën wél kunnen gebruiken.

Een ernstig probleem stond zo'n alternatieve strategie echter in de weg. De algoritmen van het bacteriële DNA zaten zo in elkaar dat het structurele gen dat de code voor het belangrijke enzym bepaalde alleen 'aan' stond als ribitol in het milieu aanwezig was. Hoewel de bacteriën dus de mogelijkheid hadden de nieuwe verbinding xylitol te gebruiken, kon deze mogelijkheid dus niet worden verwezenlijkt zonder ribitol. En dat was er niet.

Hierdoor zaten de bacteriën opgescheept met een darwinistische situatie. Alleen door een mutatie die ze in staat stelde om ribitol-dehydrogenase zonder ribitol te produceren hadden ze baat bij xylitol en konden ze groeien. Het blijkt dat zulke mutanten in een grote populatie inderdaad bestaan. Maar de mutatieveranderingen komen in een meta-uitspraak van het DNA voor, niet in een uitspraak. Deze mutatie wijzigt een regelgevend programma, zodat het gen dat de genetische code voor het benodigde enzym bepaalt tot uitdrukking wordt gebracht, ongeacht of er ribitol aanwezig is. Bij voorgaande selectie wordt de structuur van ribitol-dehydrogenase op zo'n manier gemodificeerd dat het xylitol effectiever kan omzetten. Mutanten die dergelijke verbeterde versies van het enzym produceren zouden het voordeel hebben op het xylitol sneller te groeien. Op deze manier kunnen nieuwe bacteriestammen onder laboratoriumomstandigheden binnen een paar dagen opkomen. Lin kon laten zien dat organismen met nieuwe vaardigheden kunnen ontstaan door een verandering in de programmering van de genexpressie en door verbeteringen van bestaande componenten in hun genetisch uiterlijk, in plaats van door de constructie van een volledig nieuwe component.

In 1971 maakten de biologen Roy Britten en Eric Davidson duidelijk dat de rol van de structurele genen, de 'uitspraken' van het DNA, in een zeer simpel

eencellig organisme zoals een bacterie, niet zo veel verschilt van hun rol in de veel gecompliceerdere chemie van zoogdieren. Volgens deze biologen is het ontzaglijke verschil in complexiteit tussen beide levensvormen voornamelijk te danken geweest aan de opkomst van algoritmen met een geweldig veel groter vermogen om nieuwe biologische structuren met nieuwe functies voort te brengen. Deze verschuiving van biologische eenvoud naar hogere levensvormen is eerder toe te schrijven aan het veranderende *patroon* van genenactiviteit dan aan veranderingen in de structurele genen zelf. Zoogdieren hebben een DNA-tekst die dertig keer zo lang is als die van een spons, maar deze extra lengte bestaat niet uit genen die rechtstreeks de code voor eiwitten bepalen. Volgens schattingen behoort nauwelijks meer dan 1% van het zoogdieren-DNA tot dat type. Britten en Davidson denken dat de toegevoegde teksten nieuwe verzamelingen beheersingsprogramma's bevatten. Ze concluderen:

We delen de visie dat belangrijke gebeurtenissen in de evolutiesignificante veranderingen vereisen in de patronen van genetische regulatie. Deze veranderingen bestaan zeer waarschijnlijk uit toevoegingen van nieuwe regulatiepatronen of uit reorganisatie van reeds bestaande patronen. We denken dat in het algemeen de verschijning van nieuwe structurele (voortbrengende) genen een minder belangrijk deel van de onderhavige veranderingen uitmaakt.

De evolutie is geen ladder die sport voor sport van primitieve naar verontwikkelde organismen voert. Ze zit vol met doodlopende straten, valse starts, foute bochten en in de soep gelopen experimenten. Er is geen duidelijk verband aangehouden tussen complexiteit en 'fitheid' en er zijn voorbeelden van schepselen die in de loop der tijden eenvoudiger werden. Desondanks heeft de evolutie in het algemeen en op de lange duur nieuwe levensvormen opgeleverd, waarvan de toenemende biologische complexiteit die van hun omgeving evenaart of overtreft. De Duitse zoöloog Bernhard Rensch noemt dit proces 'anagenese', in navolging van Julian Huxley. Hiermee bedoelt hij het voortschrijdende meesterschap van levende wezens over hun omgeving door een steeds hoger wordend niveau van moleculaire organisatie in de chemie van lichaam en brein.

Hoe wordt anagenese dan bereikt? Tot op zekere hoogte komt ze voort uit een meer ontwikkelde verzameling structurele genen, die de code voor nieuwe en andere soorten eiwit bepalen. Maar deze strategie is zeker niet de enige en ze wordt in de latere stadia van de evolutie minder belangrijk in plaats van belangrijker.

In de uiteindelijke evolutionaire vooruitgang die leidde tot het ontstaan van mensen zijn veranderingen in structurele genen niet frequenter geworden, zoals de traditionele evolutieleer zou voorspellen. Integendeel. Toen er een einde kwam aan de honderdmiljoenjarige periode waarin de reptielen heersten over de aarde, werden de opengevallen plaatsen ingenomen door wezens die niet bepaald imposant waren om te zien. Deze nieuwkomers plantten zich

echter op hoogst interessante wijze voort, op een manier die gewichtige consequenties zou hebben voor de toekomst van de soorten. Dit waren de placentalia, kleine dieren die het grootste deel van hun groeiperiode niet in een ei doorbrachten, zoals dat bij reptielen gebeurt, maar in het lichaam van het moederdier, waar ze voorzien werden van zuurstof en voedsel uit het moederlichaam.

Twee opvallende eigenschappen van de placentalia waren hun grotere hersenen en de langere duur van de groeiperiode tot volwassenheid. De placentalia overheersen het tijdperk van de zoogdieren, dat al zeventig miljoen jaar duurt en reikt tot in onze tijd. Toch liep de mate waarin mutaties in eiwitten bewaard bleven bij deze geavanceerde groep van dieren sterk terug in de periode tussen de opkomst van de placentalia en de komst van de voorouders van de mens, hoewel de placentalia zelf in een uitzonderlijk hoog tempo evolueerden.

Morris Goodman, hoogleraar anatomie aan Wayne State University, en zijn collega-onderzoeker G. W. Moore ontwikkelden bij het bestuderen van de evolutie van vertebraten een computermodel dat kleine veranderingen comprimeert, veranderingen die zich in de evolutie over immense tijdspanne hebben voorgedaan, zodat de film als het ware versneld wordt afgedraaid. Hiermee worden de effecten van een zwakke natuurlijke selectie gedetecteerd, die anders wellicht ten onrechte zouden worden aangezien voor het ontbreken van selectie. Dit model laat zien dat voortgang op het pad naar groeiende complexiteit in interne chemische structuur niet glad en gelijkmatig verloopt, maar voortschokkert met pieken en perioden van dalende intensiteit.

Goodmans grafiek van de snelheid van evolutionaire veranderingen in de *eiwitten* van de voorlopers van de menselijke soort gedurende de afgelopen 600 miljoen jaar lijkt op een grafiek van de koersen op de effectenbeurs van New York in de jaren voorafgaand aan de grote krach van 1929: een serie pieken en dalen die leiden tot de uiteindelijke ineenstorting. Succesvolle mutaties in eiwitten zorgen voor korte zeer snelle uitbarstingen bij de verschijning van een nieuwe lichaamsfunctie of een nieuw orgaan, veranderingen die de dieren in staat stelden nieuwe ruimten te veroveren en die het buitengewone verhaal over territoriale veroveringen afsluiten. Met elke nieuwe stap voorwaarts traden echter mutaties in structurele genen met een geringere snelheid op. Bij de eerste vertebraten lag die snelheid zeer hoog, maar daalde daarna sterk, steeg weer iets bij het ontstaan van de eerste viervoeters, vertraagde weer in de volgende 175 miljoen jaar, liep maar matig op toen de placentale zoogdieren zich ontwikkelden en nam toen krachtig af en kwam in de laatste 100 miljoen jaar vrijwel tot stilstand, op een heftige opwaartse stoot na, die echter als een nachtkars weer doofde. Deze snelheidsdaling is vooral goed aan te geven in de laatste evolutionaire stadia waarin apen en hominiden van elkaar werden gescheiden.

Goodman denkt dat deze vertraging ontstond omdat, toen de evolutie eenmaal vorm had gegeven aan de zeer complexe eiwitchemie van de hersenen en het zenuwstelsel van de mens, met de daaraan gekoppelde lange juveniele

periode, deze schitterend ingewikkelde structuur eerder stabilisering dan verbetering nodig had. Dit zou zeker gelden voor de stadia waarin het kind nog in het moederlichaam verblijft. Een grote verscheidenheid aan genenactiviteit, met een overvloed aan verschillende eiwitten in de baarmoeder als resultaat, zou gevaarlijk zijn, zo niet fataal voor het ongeboren kind, daar zijn biochemie zo exact mogelijk moet aansluiten op die van de moeder, wier afweersysteem anders wellicht haar eigen nakomeling zou afstoten.

Eenmaal verbannen uit het luxueuze heiligdom van de baarmoeder, heeft de boreling echter een groot aantal verschillende genproducten nodig, om weerstand te kunnen bieden aan de myriaden aanvallen en infecties die deel uitmaken van het onvoorspelbare proces dat zich ontplooit als je jezelf in leven wilt houden in dit aardse bestaan. Pas na de geboorte ontwikkelt zich het afweersysteem, met een geweldige hoeveelheid ingebouwde informatie over schadelijke vreemde lichamen. Rond deze tijd doorloopt ook het centrale zenuwstelsel belangrijke ontwikkelingsstadia. Het ingewikkelde netwerk van verbindingen vraagt een hoge mate van variatie in de bouwstenen waaruit de constructie wordt gevormd.

Dit alles staat onder controle van een subtiel en hoogontwikkeld systeem van algoritmen, waarschijnlijk met vele complexiteitsniveaus, in het DNA. Deze algoritmen zorgen ervoor dat de eiwitchemie van een kind eenvoudiger is binnen de baarmoeder dan daarbuiten door bepaalde genen uit te schakelen voor de geboorte en ze daarna, tijdens het opgroeien van het kind, aan te schakelen. Dit betekent uitstel van een aantal van de belangrijkste fasen van de menselijke ontwikkeling tot een later tijdstip in het leven, waardoor een verlengde jeugd en adolescentie worden gegarandeerd, als het ware zijn voorgeprogrammeerd. De tegengestelde krachten van uniformiteit en variatie zijn thans nog sterk actief in de menselijke genenpool en verzekeren zo een verlengde periode van onrijpheid.

Dus is het de 'dienstregeling' die de belangrijkste factor is in het verschijnen van de biologische finesses in de evolutie die kenmerkend zijn voor de mens. Hoe verschillender de mogelijke ervaringsgebieden voor een individu zijn, des te intenser is de vraag naar variatie in het informatiesysteem van de genen. Dit vereist een lange periode van beschermde, voorspelbare groei, gevrijwaard van verrassingen en risico's, welke het mogelijk maakt de ingewikkelde circuits en de miljarden zenuwcellen onder ordelijke, stabiele omstandigheden in de hersenen op hun taak voor te bereiden. Dit vereist ook een uitbarsting van genetische variatie die na de geboorte moet optreden. Goodman is van mening dat deze steekvlam van postnatale rijkdom de biochemische bron kan zijn van een geweldig brede scala aan talenten, smaken, vaardigheden, temperamenten en uiteenlopende denkwijzen, een scala die kenmerkend is voor succesvolle samenlevingen. In het besef dat mensen beide 'dienstregelingen' (de prenatale en de postnatale) nodig hebben om tot de intellectuele superioriteit in het dierenrijk te komen, betitelt Goodman de mens als 'het conservatieve en revolutionaire zoogdier'.

12. TOT DE DOOD GEDEELTELIJK GROEN

Een van de schandalen van de moderne biologie was de ontdekking dat mensen en chimpansees voor 99% identiek zijn voor zover het de structurele genen betreft. Op dit niveau is de genetische afstand tussen hen kleiner dan de afstand tussen de nakomelingen van de soorten fruitvlieg, die zo identiek lijken dat ze niet uit elkaar zijn te houden. Deze conclusie sloeg niet volledig onverwacht in, toen ze in 1975 werd geannonceerd. Het voorbereidende werk was al lang geleden gedaan, in 1901 in Cambridge, in de vorm van weinig verfijnde, maar werkbare methoden om immuniteitsreacties van verschillende diersoorten te analyseren; maar het belang van die resultaten werd grotendeels over het hoofd gezien. Zo'n vijftig jaar later toonde Morris Goodman de nauwe moleculaire verwantschap aan tussen chimp en mens door middel van verfijndere technieken: hij gebruikte immunologische gegevens van serum-eiwitten bij verschillende soorten primaten. Zijn proefnemingen overtuigden Goodman ervan dat chimpansees en gorilla's niet in de gibbon- en orang-oetanfamilie dienen te worden geplaatst, zoals de traditie voorschreef, maar dat ze met de mens in dezelfde familie thuishoren. En uiteindelijk, zo'n twintig jaar later, werd door Mary-Claire King en Allan Wilson, genetici aan de Berkeley University, bekendgemaakt dat het verschil in de proteïne-coderende reeksen van het DNA tussen chimp en mens slechts ongeveer 1% is.

Het is duidelijk dat in veel opzichten de afstand tussen beide soorten zeer aanmerkelijk is. Er is nauwelijks een bot in het lichaam hetzelfde. Bekken, voeten, benen, armen en vingers verschillen van vorm; de hersenen van de chimp zijn kleiner. De veranderingen gedurende de evolutie die tot zulke belangwekkende verschillen leidden, moeten hebben plaatsgevonden in de passages met algoritmen voor de timing en het gebruik van bestaande structurele genen, en niet in die gedeelten van de DNA-tekst die rechtstreeks de code van een eiwit bepalen. Een duidelijk resultaat van deze veranderingen was de opkomst van de meest kenmerkende menselijke eigenschap, de grote hersenen. In 1975 verklaarden King en Wilson: 'Het zou zeer belangrijk zijn voor de studie van de menselijke evolutie om de verschillen tussen apen en mensen te demonstreren aan de timing van genetische expressie gedurende de ontwikkeling van adaptief cruciale organische systemen zoals de hersenen.'

Het jaar daarop maakte de bioloog Emile Zuckerhandl bekend dat de hersenen van de mens in hun fundamentele scheikundige samenstelling zo overeenkomen met die van een chimpansee dat ze mogelijk geen enkel eiwit met een werkelijk nieuwe functie zouden kunnen bevatten. 'Het unieke van de menselijke hersenen moet voortkomen uit structurele en functionele varianten van eerder bestaande eiwitten en uit variaties in de hoeveelheid, timing, plaats en coördinatie van de actie en de interactie van deze eiwitten,' zei Zuckerhandl. Het is belangrijk de rol van regelgevende programma's in het DNA niet te simplificeren. Ze opereren duidelijk op veel niveaus en op verschillende

manieren. Genen die regels voorschrijven aan systemen worden vaak beïnvloed door gebeurtenissen in het buitenste domein van de cel en door communicatie tussen cellen. Om te kunnen functioneren hangen de programma's zelf ook af van de nauwkeurig aangepaste reeksen structurele genen, zodat het belang van zulke reeksen, die na lange perioden ontwikkeld zijn tot hun huidige toestand van hoge doeltreffendheid niet onderschat mag worden. In sommige gevallen zijn de structurele genen ook regelgevend: dan produceren ze eiwitmoleculen die instrumenten zijn om andere genen in of uit te schakelen.

Roy Britten heeft onze huidige onwetendheid omtrent de precieze aard van dergelijke besturingssystemen 'onpeilbaar' genoemd. Maar hij en andere biologen nemen aan dat er een fundamentele besturingsbron is die de timing van de genetische expressie beheerst en dat deze bron te vinden is in de informatie van het DNA, in zijn 'meta-uitspraken'. Daar moeten we kijken om het wezenlijke biochemische verschil tussen mens en aap te vinden.

Bij het ontwikkelen van zijn informatiestructuur voor de aanmaak van onze intelligente soort, koos het menselijke DNA een erg vernuftige strategie. Een verandering van programma's resulteerde in een aanmerkelijke verandering in de chronologische tabel van het groeiproces. Deze 'dienstregeling' werd, vermoedelijk door mutaties, op zeer curieuze manier herschreven, waardoor ze weliswaar radicaal ging verschillen van die van de primaten-voorouders van de mens, maar er vreemd genoeg toch op leek. Ze behield sommige kenmerken van het primatensysteem, maar keerde ze om.

Wanneer het volwassen is lijkt het menselijk mannetje of vrouwtje op een aap die nog in het embryonale of kinderlijke ontwikkelingsstadium verkeert. Anders gezegd, een apekind lijkt in een aantal opzichten opvallend sterk op de volwassen *Homo*. Dit is geen regressieve trek. Absoluut niet. Het is een biologisch kunststuk van het hoogste belang, dat leidt tot de opkomst van de geest.

Overprogrammeren was het geheim, het veranderen van de timingsregels. De strategische vertraging in de 'dienstregeling' van het lichaam zette de groei vast van bepaalde kenmerken van de primatenanatomie, vroer die tijdens een kinderlijk ontwikkelingsstadium in. De foetus van een aap heeft een plat gezicht, lange nek, rond hoofd, kleine tanden en zware hersenen in verhouding tot het totale lichaamsgewicht. De botten van de hersenpan zijn dun, de richels boven de ogen onontwikkeld en het lijf heeft niet veel haar. Nog opmerkelijker is dat bij een aap in het embryonale stadium de plaats waar de ruggemergstreng de schedel binnenkomt rechtstreeks onder de hersenen ligt, wat het mogelijk maakt rechtop te staan. Maar wanneer de aap zich ontwikkelt, verschuift de plaats van binnenkomst naar achter de hersenen, waardoor rechtop staan onpraktisch wordt. De bij de mens vertoonde vertraagde ontwikkeling houdt in dat deze kritieke verschuiving naar achteren nooit plaatsvindt, waardoor de mens in staat is rechtop door het leven te gaan.

Deze techniek om volheid te vertragen, om tot in het volgroeide leven de onvolwassen trekken van voorouderlijke soorten te bewaren, wordt 'neotenie'

genoemd, een neologisme uit 1883. Het betekent letterlijk 'de jeugd bewarend'. Neotenie is een begrip dat in zwang kwam door de Nederlandse antropoloog Louis Bolk, die tussen 1915 en 1926 een embryo-ontwikkelingstheorie lanceerde. Bolks ideeën over de evolutie gingen tegen die van Darwin in en staan vandaag slecht te boek. Hij geloofde dat transformatie plaatsvindt langs een vastgelegde weg en op een gestandaardiseerde, gecoördineerde manier wordt geleid door innerlijke krachten. Daarom legde de theorie van Bolk vele jaren lang het loodje, beneveld als ze was door de twijfelachtige filosofie van het vitalisme waarop ze was gebaseerd. In de laatste jaren zijn Bolks opinies verlost uit deze schemertoestand en hebben ze een eigentijds commentaar gekregen. Zijn metafysische speculaties zijn nu zorgvuldig gezeefd en gescheiden van zijn nuttige wetenschappelijke inzichten.

Door de ontwikkeling van het lichaam te vertragen kan de evolutie tot op zekere hoogte in 'haar achteruit gezet worden', zodat een soort die overgespecialiseerd is geworden en het gevaar loopt te eindigen in een doodlopende straat door te weinig te goed te doen, zich kan terugtrekken op een minder gespecialiseerde vorm.*

* De zoöloog Walter Garstang, een ontwapenend strijdlustige figuur, die verscheidene komische verzen schreef over het onderwerp neotenie en over andere, duistere, aspecten van de biologie, was een van de eersten die inzagen hoe diep de invloed van neotenie zou kunnen zijn op toekomstige evolutionaire gebeurtenissen. Garstang had speciaal studie gemaakt van bepaalde larfachtige vormen van zeedieren die omhoog worden gegooid door op de zeebodem wonende organismen, zodat ze de soort her en der in de oceaanstromingen verspreiden. Deze larven waren door natuurlijke selectie speciaal aangepast aan hun bijzondere bestaanswijze. Garstang zag in dat er twee tegengestelde soorten evolutionaire behoeften in de larven bestonden. De ene behoefte is volwassen te worden en zich op de zeebodem te vestigen om zich voort te planten. De andere, tegengestelde behoefte is om zolang mogelijk in een onvolwassen, drijvende toestand te blijven, om de soort over een zeer uitgestrekte omgeving te verspreiden.

Garstang kwam tot de conclusie dat zowel de onvolwassen als de volwassen stadia door evolutionaire verandering konden worden gewijzigd en dat deze wijzigingen zwaarwegende gevolgen konden hebben, niet alleen voor de volwassenen van de soort, maar voor haar hele toekomst. Veronderstel dat een primitief, ongewerveld organisme op de zeebodem, zoals een zeester of een zeeëgel, larven naar boven stuurde die door neotenische strategieën in de larvale vorm lange tijd konden gaan drijven en de ontwikkeling van de voortplantingsorganen in verhouding tot de rest van het lichaam versnelden. Het organisme zou gemakkelijk een sterke staart kunnen krijgen, waardoor het doelmatiger zou kunnen zwemmen dan de zwakke uitrusting, waarmee de natuur hem oorspronkelijk had uitgerust, toeliet. Door zo geslachtelijk rijp te worden tijdens het zwemmen zou het nooit meer naar beneden hoeven te verhuizen.

Garstang vroeg zich af of dit actieve, vrijelijk bewegende wezen de voorloper had kunnen zijn van de eerste gewervelde dieren, die tot de vissen leidden en uiteindelijk tot mensen. Als die gissing juist zou blijken te zijn, zou ze de enorme, progressieve macht van neotenie als evolutiestrategie aantonen. Garstangs schoonzoon, A.C. Hardy, verspreide deze ideeën in de jaren vijftig, met het argument dat belangrijke groepen in het dierenrijk zonder neotenie zich nooit hadden kunnen ontwikkelen en dat tot de groepen die zich wel zo ontwikkelden sommige van de meest geslaagde soorten in de evolutie behoren.

Veel verschillende schepselen in de natuur hebben neotenische kenmerken. De King-Charlesspaniël is een van de meest bekende. Schoothondjes zijn neoteen, evenals een soort krekeltje, de vrouwelijke gloeiworm (niet de mannelijke) en schapen met grote hoorns. De volwassen struisvogel behoudt de zachte donsveren van een nestkuiken en heeft zijn vliegvermogen verloren. Honden zijn neotenische wolven.

Niet alle lichaamsdelen hoeven in neotenie achterlijk te zijn. Het beroemde voorbeeld van deze gedeeltelijke afremming van de groei is de tijgersalamander (*Ambystoma tigrinum*). Individuen in Noord Amerikaanse populaties ontwikkelen zich helemaal: de volwassene verliest zijn kieuwen, ademt door zijn longen en brengt het merendeel van zijn tijd op het land door. Van de andere kant zijn individuen van Mexicaanse populaties, bekend als axolotls, neoteen: hoewel ze er volwassen uitzien, behouden ze hun kieuwen en verlaten ze nooit het water. Zo'n strategie kan een ontsnappingsroute uit veel te enge specialisatie aanreiken, waardoor de onvolgroeide vorm zich nog steeds in een nieuwe richting kan ontwikkelen wat misschien tot een totaal ander dier kan leiden, onverschillig hoe gespecialiseerd de volwassen vorm van een soort ook is.

In het algemeen heeft neotenie in de menselijke soort de meest belangrijke invloed op de vorming van de grote hersenen. De hersenen van de grote apen, familie van *Homo*, groeien het meest in het eerste levensjaar, wat een verlengde periode van intellectuele ontwikkeling onmogelijk maakt. Bij de geboorte zijn de hersenen van een gibbon voor bijna driekwart voltooid en na de eerste zes maanden zijn ze volledig gevormd. Menselijke hersenen ontwikkelen zich heel anders. Hun gewicht wordt meer dan verdubbeld in het eerste levensjaar, in het tweede jaar nemen ze met meer dan 25% toe en in het derde met meer dan 15%.

De timing van de uitdrukking van de genen in het groeiende organisme bleek een proces dat veel meer is dan een miraculeus ingewikkelde illustratie van de manier waarop de natuur informatie gebruikt om materie te structureren. We hebben het hier over iets veel opmerkelijkers: de hypothese dat een verandering in de timing van de genetische expressie *Homo sapiens* het toneel van de prehistorie opstuurde en de enorme, langzaam rijpende hersenen mogelijk maakte van een soort die meer kan doen dan alleen maar haar wereld waarnemen en onmiddellijk daarnaar handelen. De menselijke hersenen verschaffen een betekenisvolle ruimte tussen waarneming en handeling; in deze ruimte ontstonden complexe vormen van abstracte kennis en vruchten van de beschouwende geest: mythe, religie, kunst, literatuur en wijsbegeerte.

Een zodanig gewijzigd groeiprogramma, zo belangrijk voor de unieke positie van de mens, wordt in de hand gehouden door algoritmen, of regels, die de DNA-boodschap bevatten. Deze algoritmen zijn in de loop van de evolutie duidelijk veranderd en wel zo dat het de mens mogelijk is neoteen te worden, door vertraging van de ontwikkeling van sommige fysieke kenmerken en

vertraagde rijpheid voor de hersenen. Dit betekent dat het schema voor de vorming van de hersenen niet onmiddellijk eindigt, of zelfs kort nadat het kind de moederschoot heeft verlaten. Na de geboorte groeien de hersenen door in een tempo dat bijna even hoog ligt als vóór de geboorte. Het resultaat is dat de schakelingen van zenuwcellen nog steeds worden aangelegd wanneer het kind opgroeit en zich leert verstaan met zijn wereld. Ze staan open voor alle gevolgen van de informatie die van buitenaf binnenstroomt.

Door het ontwikkelingsschema af te remmen, houdt neotenie de hersenen in ontwikkeling, omdat zij worden achtergehouden in het embryonale stadium - en dat embryonale stadium is er een van snel groeiende hersenen.

Slechts een fractie van de ontwikkeling van onze hersenen vindt plaats binnen de baarmoeder tijdens de dracht. De rest is verdeeld over twee decennia van ervaren en leren. Een voor de hand liggend gevolg van deze uitzonderlijke regeling is dat de mens, anders dan andere soorten, veel minder vastzit aan automatische of instinctieve mentale trekken, geërfd van en gespecificeerd door de informatie in de genen. Hij wordt krachtiger beïnvloed door de actieve confrontatie met zijn omgeving. Door het rekken van de kinderjaren is de menselijke soort opmerkelijk afhankelijk geworden van het sociale kader en de verhoudingen binnen het gezin gedurende de vroege jeugd. Maar tegelijkertijd is de mens buitengewoon individualistisch. Zijn hersenen zijn zo complex en kneedbaar en rijpen zo langzaam, dat elk stel uniek is voor zijn bezitter en van individu tot individu een duidelijke en verrassende fysieke variatie vertoont. Dr. Peter Huttenlocher, hoogleraar in de kindergeneeskunde aan de universiteit van Chicago, heeft ontdekt dat het kind een complexere verzameling verbindingen tussen de zenuwcellen in de cerebrale cortex heeft dan het ooit als volwassene zal hebben. In tegenstelling tot wat geloofd werd, neemt het aantal van deze verbindingen met de leeftijd niet toe maar af. Desalniettemin zijn de hersenen van een zesjarige minder en onregelmatiger actief dan die van een volwassene en ook dit vergroot het vermogen van een kind zich kennis te verwerven en zich kennis te herinneren. Huttenlocher zegt: 'Een van de meest interessante aspecten van de zesjarige hersenen is dat een kind met weinig ervaring in dit cruciale jaar later met inhalen bijzonder veel moeite heeft, zelfs als het daar erg zijn best voor doet. Zes lijkt een kritieke periode te zijn, waarin de hersenen bijzonder ontvankelijk zijn.'

Neotenie remt het tempo van lichaamsontwikkeling bij de mens af en geeft hem daardoor een langere jeugd dan zijn primaten-voorouders en hersenen die in de eerst levensfase net zo snel groeien als in de moederschoot. Dit was een revolutionaire verandering, resulterend in een unieke openheid voor nieuwe informatie op een tijdstip dat het kind volledig afhankelijk is van zijn ouders, die zoveel tijd besteden aan zijn verzorging en geestelijke verrijking. De kneedbaarheid van de hersenen van het kind, hun buigzaamheid en redundantie stellen het in staat zijn hulpbronnen te verschuiven en te reorganiseren om te voorzien in de behoefte van verschillende levenswijzen, waardoor de menselijke soort de minst eng gespecialiseerde is van alle dieren. De hersenen worden geleverd met een genereus aantal mogelijke organisatiepatronen in de

vroege jeugd. Welke patronen in werkelijkheid ontwikkeld worden kan afhangen van de ervaringen van elk kind, van zijn of haar capaciteiten, voorkeuren, motiveringen en de geestelijke stimulatie die in de kritieke periode gegeven wordt. De grote, langzaam rijpende hersenen hielpen bij een vlucht uit de val van overspecialisatie, die de toegangsweg naar verdere evolutionaire vooruitgang blokkeert. Geen enkele evolutionaire gebeurtenis heeft zo'n transformerend effect gehad op het leven van de planeet; neotenie is het biologische principe dat beschaving mogelijk maakte.

Een verlengde groeiperiode, mogelijk gemaakt door wijzigingen in de 'dienstregeling' van de ontwikkeling, neigt tot het naar voren schuiven van een meer wendbare en interessantere soort, een die gevarieerder is in geestelijk, emotioneel en lichamelijk gedrag. Er bestaat een verzwakt gevoel voor de dwingende krachten van overleven en competitie, van de natuur met haar bebloede tanden en klauwen, die de wereld van Darwins visie zo rauw en meedogenloos maakt. Neotenie lijkt dan ook niet goed te werken in het geval van zoogdieren die grote nesten werpen, zodat de jongen hevig moeten vechten voor plaats, voeding en aandacht. In een groot nest roept de strijd voor de eerste levensbehoeften een verkorting op van de periode van kinderlijke afhankelijkheid en een versnelling van de dag van volwassenheid. Maar wanneer de mededinging wat afgezwakt wordt door het afnemen van de gezinsgrootte, schept een verlengde jeugd een decor waarin de jongen kunnen experimenteren en nieuwe gedragsvormen uitproberen binnen de veilige, voorspelbare omgeving van het gezin.

En dat is precies het type omgeving waarin volgens moderne opvoedkundigen kinderen kunnen leren lezen, schrijven en andere vaardigheden verwerven op een verrassend vroege leeftijd. Het geheim van wendbaar gedrag is het bezit van interessante ervaringen opgedaan onder stabiele omstandigheden, zo ver mogelijk verwijderd van ernstig gevaar. Een van de belangrijkste ervaringen is het spel. Het spel, de normale bezigheid van kinderen die zich veilig voelen, is een verschijnsel van wendbaarheid dat neigt tot het opleveren van meer wendbaarheid. Het is een activiteit waarin typisch neotenische wezens zich storten.

Toen theoretici zich meer dan een eeuw geleden bogen over het spelen, beschouwden ze dit als een voertuig voor het op onschuldige wijze ontladen van overvloedige energie. Zoals dat ook het geval is geweest in andere takken van kennis, heeft speltheorie in termen van energie meer recentelijk plaats gemaakt voor een op informatie gebaseerde theorie. Men begon het spelen, tenminste voor een deel, te zien als een element in het leerproces.

Spelen is tot op zekere hoogte een symbolische bezigheid. De regels ervan zijn te doorbreken of nieuwe regels zijn uit te vinden, zonder dat dat leidt tot ernstige gevolgen. Het gedijt het best wanneer het aannemelijk is dat de gevolgen van een handeling minder belangrijk zijn dan de handeling zelf. We

kunnen nieuwe gedragsvormen uitvinden zonder de risico's die normaliter gepaard gaan met breuken in de code van volwassenen. In spel is het mogelijk tot het uiterste te gaan, een waaghals te zijn en te experimenteren, waardoor de grenzen van het toelaatbare en het praktische ten volle te testen zijn.

Spontane innovatie is het stempel van het spel. Jerome Brunner heeft geopperd dat het gebruik van gereedschappen in de evolutie misschien niet is opgekomen door een darwiniaanse, erop-of-eronder soort druk, maar na een lange periode van een niet-geforceerd bestaan, vrij van druk, in een territorium dat niet doorlopend hoefde te worden verdedigd. In deze visie was technologie een soort uitbreiding van het spel, dat onder dezelfde voorwaarden en om dezelfde redenen floreerde.

De tijdsplanning van de menselijke ontwikkeling, gecodeerd in het DNA, geeft een royaal aantal jaren voor dit avontuurlijke, zorgeloze stadium in een kinderleven, waarin het zich thuis voelt bij het nieuwe en onbekende. Maar deze periode heeft niet een open einde. Jonge kinderen zijn vaak erg goed in het improviseren van liedjes en het uitvinden van nieuwe metaforen zonder zich van hun originaliteit bijzonder bewust te zijn. Ze hebben een verbeeldingrijke en frisse manier van uitdrukken over zich, spontaan en niet zelfbewust. Howard Gardner, een psycholoog aan Harvard University, heeft voorbeelden gegeven van de produkten van de verbeelding van kinderen die het niveau van echte poëzie bereiken. Een meisje beschrijft haar blote lijf als 'helemaal op blote voeten'. Een ander kind heeft het over het luchtschrift van vliegtuigen als 'een litteken in de lucht'. Gardner zegt dat kinderen, bijna zonder uitzondering, tekeningen en schilderijen maken die qua kleur, gebruik en gevoel voor compositie 'minstens een oppervlakkige verwantschap vertonen met de werken van Klee, Miró of Picasso'.

Wanneer het kind echter ouder wordt verdwijnt de poëzie geleidelijk uit zijn taal, neemt de kwaliteit van zijn tekenen af en verzwakt de zin voor avontuur op alle terreinen van geestelijke en kunstzinnige inspanning. Het conformisme zet in en het spel wordt onderworpen aan strikt in acht genomen vaste regels. Symbolen worden gemanipuleerd zonder hetzelfde gevoel van waaghalzerij en zelfverzekerdheid. Tekeningen worden nagetekend, taal is prozaïsch. Kinderen worden ontvankelijker voor het werk van anderen. Gardner noemt dit stadium de periode van het literalisme, een periode voor het leren beheersen van regels, tradities en normen en voor het begrijpen van de technische aspecten van kunst, stijl, balans en compositie. Heel weinig kinderen kunnen de gave van het zich oorspronkelijk uitdrukken herwinnen; dat kunnen ze alleen maar na het verwerven van een bewuste techniekbeheersing. Ze hebben de ongegeneerde, ongeoefende vrijheid van de jeugd verloren en in plaats daarvan moeten ze leren vernieuwend te zijn, volledig de regels te doorbreken, niet in onschuld, maar volledig bewust. Vóór ze kunstenaar kunnen worden, moeten ze door een letterlijk stadium gaan en dit stadium is een wezenlijk onderdeel van hun ontwikkeling.

Er bestaat een soort 'gevoelige periode' in de jaren naar de adolescentie, zo concludeert Gardner, waarin de toekomstige kunstenaar vaardigheden vlug

moet leren zodat, bij het aanbreken van de adolescentie, het bezit van een goede techniek hem bestand doet zijn tegen de aanval van zijn eigen, zich ontwikkelende kritische vermogens. Het kind creëert gedachteloos, de volwassene met groot besef van de techniek, maar toch hebben ze een zekere openheid gemeen, een bereidwilligheid om nieuw terrein te ontdekken en te ontsluiten, waardoor de stoutmoedige impulsen van de jeugd doorzetten in een nieuwe gedaante, in de werken van de rijpe kunstenaar. In zijn voorwoord bij de herziene druk van *The Magus*, een roman over de pijn van het volwassen worden, schreef John Fowles dat het boek

altijd in belangrijke mate een adolescentieroman moet blijven, geschreven door een vertraagde adolescent. Mijn enige pleidooi is dat alle kunstenaars de volledige omvang van hun eigen leven vrijelijk moeten doorkruisen. De rest van de wereld kan zijn persoonlijke verleden censureren en begraven. Wij kunnen dat niet en moeten dus tot aan onze sterfdag gedeeltelijk groen blijven... onrijp-groen in de hoop vruchtbaar-groen te worden.

Spelen, verlengde jeugd en grotere hersenen zijn samenhangende thema's in de evolutie. Want zover de wetenschap in staat is geweest terug te reiken in de voorgeschiedenis, blijkt dat zoogdieren grotere hersenen hebben gehad dan andere gewervelden; vanaf het allereerste begin hadden de primaten grotere hersenen dan andere dieren, in verhouding tot de grootte van hun lichaam. Primaten leven langer en rijpen langzamer dan andere zoogdieren van vergelijkbare grootte. Apen die niet tot de primaten horen verlaten de moeder na een paar maanden, terwijl chimpansees vier, vijf jaren genieten van de moederlijke aandacht en bescherming. Mensen hebben een jeugd en adolescentie die twee keer zo lang duurt als die van de grote apen. En het vermogen te spelen gaat hand in hand met de verlengde jeugd. Omhoog klimmend langs de ladder der primaten merken de antropologen dat het spel steeds meer centraal staat in het groeiproces en dat dit het meest wezenlijke is van de mens.

De genetische principes die ten grondslag liggen aan deze bijzondere, onderling verbonden karakteristieken zijn niet zozeer te vinden in de structurele reeksen van de DNA-boodschap, hoewel ze van groot belang zijn, als wel in de timing van de ontwikkelingsstadia. En deze timing staat onder controle van uiterst complexe regelgevende systemen, 'informatie over informatie', die hun geheimen nog moeten ontsluiten voor de huidige biologie. Men denkt dat hier het antwoord op vele vragen ligt. Belangrijke aspecten van deze systemen begrijpen we niet. Maar als we dat kunnen, zegt Roy Britten, 'zullen we de aard van het bestaan begrijpen.'

13. ASTRONAUTEN UIT DE OUDHEID OVERBODIG

Plotselinge versnellingen in het evolutieproces, sprongen van het ene niveau naar het andere, zijn niet te begrijpen in termen van afzonderlijke mutaties, één voor één, in de structurele genen van de voorouders van de mens.

Het is de moeite waard niet aan dit punt voorbij te snellen, want juist op het netelige aspect van de evolutionaire sprongen is de theorie van Darwin het zwakst en het minst bevredigend.

Tijdens de eerste helft van de negentiende eeuw waren de meeste geologen van oordeel dat de geschiedenis van de aarde werd gemarkeerd door een reeks rampen van goddelijke oorsprong; de bijbelse zondvloed was daar een treffend voorbeeld van. Darwin echter was als student in Cambridge, die zich voorbereidde op een kerkelijke loopbaan maar steeds meer in de ban raakte van de natuurwetenschappen, overgeleverd aan de ideeën van geleerden die dachten in termen van geleidelijke gedaantewisselingen in de geologie van de aarde. Op zijn in 1831 begonnen reis als scheepsgeoloog aan boord van de *Beagle* nam Darwin een exemplaar mee van het kort tevoren gepubliceerde eerste deel van Charles Lyells *Principles of Geology*, dat het idee van opeenvolgende, door de godheid bevolen aardverschuivingen afdoende de grond in boorde, en daarvoor in de plaats een proces voorstelde van mildere en gelijkmatigere veranderingen, opgeroepen door krachten die vanaf de vroegste tijden tot op de dag van vandaag niet veranderd zijn.

Catastrofisme was niet uitsluitend een theologisch concept, maar was mede gebaseerd op wetenschappelijk bewijsmateriaal over hiaten in de fosielsekken. Lyell nam echter het standpunt in dat levende soorten geleidelijk uitstierven en dat doorlopend nieuwe soorten werden geschapen. Net klaar met het bestuderen van Lyell zette Darwin, toen de *Beagle* op 6 januari 1832 haar anker liet vallen op de rede van St. Jago op de Kaapverdische Eilanden, voor het eerst voet aan wal in de tropen. Daar zag hij met eigen ogen een volmaakte horizontale witte band aan de buitenkant van een rots in zee, hoog boven het water. Deze witte band bestond uit een 'kalkachtige materie' waarin duizenden zeeschelpen zaten. Darwin dacht dat het gladde en rechte van deze schelpenlaag, die eens de bodem van de zee had gevormd, een teken was dat het eiland in de loop der eeuwen langzaam en geleidelijk naar boven was gekomen, in plaats van te zijn opgeworpen tijdens een plotselinge hevige catastrofe. Hij merkte in zijn autobiografie op dat dit inzicht 'mij overtuigde van de oneindige verhevenheid van Lyells gezichtspunten boven die in elk ander mij bekend werk'.

De these van de geleidelijkheid had toen al een lange geschiedenis van tegenstrijdigheden achter de rug en kon zich zelfs in victoriaanse tijden niet verheugen in een kalm bestaan. In het licht van onlangs verworven kennis wordt ze ook thans weer onder vuur genomen. Nieuw onderzoek in de

paleontologie, inclusief de ontdekking van microfossielen die zo'n 3,5 miljard jaar oud zijn, zorgt voor ernstige twijfel aan het idee dat evolutionaire veranderingen 'langzaam en gestaag' verliepen. Er schijnt bijvoorbeeld een scherpe breuk geweest te zijn tussen het leven zoals dat bestond in het immense tijdperk dat de 'Precambrische' periode van de geschiedenis van de aarde heet, waarin de microscopische vormen in de loop van miljarden jaren weinig verandering vertonen, en het plotseling op grote schaal verschijnen van meer complexe organismen zo'n 570 miljoen jaar geleden. De overgangperiode lijkt onverwacht explosief te zijn, gemeten naar de bedaarde normen van het geologische tijds kader: niet meer dan 100 miljoen jaar.

Stephen Jay Gould (Harvard University) wijst op de buitengewone schaarste aan transitionele vormen tussen de ene en de andere soort in de evolutie - de 'missing links' in de fossielreeksen - en hij gelooft dat daarmee de theorie der geleidelijkheid nu vervalt als mogelijke beschrijving van de evolutie, aangezien ze veel betrekkelijk abrupte ontwikkelingen, het formaat en de structuur van de menselijke hersenen inclusief, niet kan verklaren. Gould zegt:

De paleontologen hebben kennelijk geen gevallen gedocumenteerd van langzame en geleidelijke transformatie, stap voor stap langs de bodemlagen van een helling, bij paarden noch mensen.[...] In plaats daarvan heeft het merendeel van de fossiele soorten twee gemeenschappelijke kenmerken: ten eerste, dat ze gedurende de gehele loop van hun bestaan niet opvallend veranderden, en ten tweede, dat ze in de verslagen plotseling verschijnen, of door hun voorouders te vervangen, of samen met hen te bestaan. Kortom: stilstand en plotselinge vervanging markeren het einde van de meeste soorten.

Als de evolutie eerst en vooral wordt gezien als een informatieproces, dan moeten de redenen voor de snelle opkomst van het evolutionair nieuwe, door de paleontologen opgemerkt in de fossielreeksen, worden gezocht in de structuur van de DNA-boodschap. In de informatietheorie wordt het nieuwe gerelateerd aan het aantal mogelijkheden in de boodschappenbron. In levende organismen kunnen deze mogelijkheden bestaan als ongebruikte informatie in de genen. Evolutionaire innovatie, het scheppen van nieuwe organen met nieuwe functies, zou dan worden bewerkstelligd door de mogelijkheden te verwezenlijken.

De Amerikaanse geneticus Susumu Ohno denkt dat dergelijke mogelijkheden in de evolutie werden aangedragen door de toevallige verschijning van 'nutteloze informatie' in het DNA van organismen. Dit nam zijn beslag door herhaling, de eenvoudigste vorm van redundantie. Bestaande genen dupliceren zichzelf en brachten exacte kopieën voort die in het begin helemaal overbodig waren, nutteloos voor het organisme. De DNA-tekst werd uitgebreid, maar het effect was als een boek dat bestaat uit een voortdurende herhaling van dezelfde paar bladzijden: meer kopieën van de bladzijden geven geen nieuwe informatie.

Met het verstrijken van de tijd ondergingen de redundante genen echter toevalsmutaties. Ze waren niet langer afschriften en werden unieke reeksen,

nieuwe pagina's in het levensboek. Deze reeksen waren heel vaak wartaal, louter genetische ruis, zonder betekenis in termen van een eiwitprodukt. Ohno vermoedt dat het grote aantal onzinnige passages in het DNA van hedendaagse organismen relictten zijn van deze geklutste genen, die van de tekst een rommel maken, zoals de fossielen van uitgestorven dieren rommelig over het aardoppervlak zijn verspreid. Maar in sommige gevallen kunnen mutaties resulteren in een genetisch afschrift dat betekenis krijgt. Zo kan een structureel gen gaan coderen voor een nuttig nieuw eiwit, of kan een gen dat deel uitmaakte van een regulerend systeem de timing wijzigen van het tot expressie komen van de structurele genen op een manier die gunstig voor het organisme uitpakt. Deze extra pagina's zouden dan zinnige nieuwe informatie aan het boek toevoegen.

Het is zelfs nog interessanter dat een genetisch afschrift, beschouwd als extra pagina, door de natuurlijke selectie vaak over het hoofd wordt gezien, zelfs wanneer het mutaties ophoopt, zolang de 'oorspronkelijke pagina', waarvan het een replica was, doorgaat met de vervulling van haar nuttige rol. Het staat het afschrift vrij te veranderen op manieren die bij het origineel niet toegestaan zouden zijn. Pas wanneer het nieuwe gen een nuttige betekenis verwerft, kan het 'onder de bescherming' komen van natuurlijke selectie en bewaard blijven.

In de evolutie hebben explosies van genetische duplicaties plaatsgevonden, zo betoogt Ohno, toen de verre voorzaten van landdieren nog in zee zwommen of tussen water en vaste wal pendelden. Later verwierven voorouderlijke zoogdieren hele verzamelingen afschriften van bestaande genen en met het verstrijken van de tijd werden deze nutteloze pagina's, die geen nieuwe informatie bevatten, herschreven door mutaties om andere genen met nieuwe functies te worden.

Genetische afschriften vormen een bron voor experiment en creativiteit in de evolutie. Ze zijn avontuurlijk en reiken 'nieuwe hypothesen' aan, die pas later worden getoetst aan de natuurlijke selectie, een in wezen conserverende kracht die slechts het reeds bestaande kan wijzigen. De extra pagina's in het script zijn mogelijkheden, mogelijke informatie, zeer overvloedig ten opzichte van datgene wat het organisme nodig heeft om te overleven.

Het feit dat belangrijk nieuwe stappen in de evolutie gewoonlijk niet werden gezet door de verst gevorderde leden van een klasse dieren, maar door een primitiever en eenvoudiger lid ervan, wekt onze nieuwsgierigheid. Ohno wijst erop dat de verklaring voor deze schijnbare paradox onmiddellijk duidelijk is, als het woord 'primitief' wordt opgevat als 'ongespecialiseerd', niet gebonden aan enge gedragspatronen. Een eenvoudig, gegeneraliseerd wezen is als een maagdelijk blad papier, klaar om schrift te ontvangen. En juist een dergelijke soort was de oorspronkelijke voorouder van de gewervelde dieren. Haar DNA was uitgerust met grote hoeveelheden redundantie en uiteindelijk groeide hieruit nuttige informatie.

Ohno gelooft dat ook een overdaad van mogelijkheden de genetische fundamenteën voor de menselijke hersenen legde. Een aanbod van nieuwe genen, in

veel grotere aantallen dan benodigd, produceerde de bouwstenen voor hersenen, veel complexer dan nodig om zich te verstaan met een primitieve omgeving. De complexiteit van de hersenen komt voort uit het ingewikkelde netwerk van verbindingen tussen zenuwcellen en men denkt dat deze verbindingen worden bepaald door de onderlinge aantrekkingskrachten van eiwitten aan het oppervlak van individuele cellen. Een constellatie van tientallen of zelfs honderden verschillende eiwitten aan het celoppervlak vormt een uiterst specifiek 'sleutel-en-sleutelgat-verband' met eiwitten op andere cellen.

Een ontzaglijke verscheidenheid van eiwitconstellaties is nodig voor zo'n ingewikkeld communicatiesysteem. Ohno vermoedt dat deze verscheidenheid werd verkregen door 'uitbarstingen' van genetische afschriften, die buiten het bereik van de natuurlijke selectie muteerden en nieuwe functies verwierven. Zoals we al hebben opgemerkt, kunnen deze nieuwe genen of structureel, of regulerend zijn geweest.

Vanuit dit gezichtspunt was er een overvloed van nieuwe eiwitten en nieuwe programma's en waren deze ruim op tijd om een evolutionaire sprong mogelijk te maken en hooglijk gecompliceerde hersenen te produceren, ver voor de opkomst van de beschaving, waardoor capaciteit voor een menselijke cultuur niet geleidelijk kwam, maar als in een bliksemflits. Ohno gelooft vooral dat de Neanderthaler al in het bezit was van hersenen, waarvan de biochemische structuur even ingewikkeld was als die van de huidige mens. Hij stelt de vraag: 'Bevatte de DNA-tekst van onze holbewonende voorganger een verzameling of verzamelingen genen die het de moderne mens mogelijk maakt respectievelijk maken oneindig gecompliceerde muziek te componeren en romans met een diepzinnige betekenis te schrijven? Men wordt gedwongen bevestigend te antwoorden.'

Deze hypothese verplaatst de hele discussie over genetische informatie naar hoogst omstreden domeinen en beroert vragen die een flink deel uitmaken van de gisting van nieuwe ideeën en ontdekkingen op het terrein van de voorgeschiedenis van de mens. Het verschijnen van complexe hersenen werpt vragen op waarvoor we nog geen antwoorden hebben. Het idee dat hersenen zich tot hun volle omvang ontwikkelen in primitieve wezens wier geestelijk zicht zo beperkt wordt verondersteld, in hoge mate geteisterd door bijgeloof en schijnvermoedens omtrent de natuur, is paradoxaal. Dezelfde hersenen beheersen vandaag de fijne kneepjes van de quantumfysica, ontrafelen de genetische code en bouwen ruimteschepen die de mens naar de maan brengen.

Denkbeelden over de oorsprong van cultuur, en dus over de ontwikkeling van het menselijke intellect, zijn in een stroomversnelling gekomen. Nu de mistbanken van de prehistorie iets beginnen op te trekken, wordt cultuur gezien als uitzonderlijk oud. Misschien gaat ze zelfs 3 miljoen jaar terug, tot de tijd van de *Australopithecus*, een mensachtige aap met mogelijk een flauwe notie van symboliek. Kieselstenen die zijn gevonden bij de sporen van de

Australopithecus vertonen natuurlijke lijnen die op gezichten lijken. *Homo habilis*, de gereedschap-makende 'klusjesman' die 2 tot 2,5 miljoen jaar geleden op de savannen, leefde kende mogelijk enige vorm van ritueel. Er zijn bij de skeletten van *H. habilis* voorbeelden gevonden van met de hand bewerkte rode oker. *Homo erectus*, die ongeveer 1 miljoen jaar later aantrad, had een hersenomvang die in sommige gevallen die van de moderne mens benadert. Hij was de eerste voorouder van de mens van wie we weten dat hij vuur gebruikte. De gereedschappen van *H. erectus* werden zorgvuldig en nauwkeurig gemaakt voor uiteenlopende doelen. Hij jaagde op groot wild, waaronder olifanten; dit vereist vermoedelijk een hoge graad van samenwerking en communicatie met behulp van een primitieve vorm van taal.

Het oudste voorbeeld van het doelbewuste gebruik van symboliek stamt van zeer lang geleden en hoort bij de latere periode van *Homo erectus*. Het betreft de rib van een os met gegrifte lijnen in de vorm van een franje van dubbele bogen, die gevonden werd in Pech de l'Azé, in een laag van ongeveer 300 000 jaar oud. Zo'n ontdekking verschuift de eerste aanzetten van complexe, symbolenmakende activiteiten, met alles wat dat impliceert voor het geestelijke vermogen van de vroege mens, wel tot een zeer ver verleden.

De Neanderthaler die ongeveer 100 000 jaar geleden verscheen, werd ooit afgeschilderd als een voorovergebogen lopende, primitieve bruint, een geestelijke sukkel, nauwelijks geschikt om 'mens' te worden genoemd. Dit beeld is nu helemaal veranderd. Men weet dat de Neanderthalarmens geraffineerde werktuigen heeft gebruikt die waren samengesteld uit zorgvuldig gebouwde onderdelen. Zijn hersenen waren iets groter dan die van de huidige mens, wat bij zijn massievere gestalte paste. Neanderthalers voerden rituelen uit en begroeven hun doden met ceremonie en gevoel voor het transcendente: stenen voorwerpen en gekookt voedsel zijn in afzonderlijke graven gevonden en ten minste zeven verschillende soorten bloemen werden neergelegd in een ondiepe Neanderthaler groeve in Shanidar (Irak).

De Neanderthalers zijn omgeven door vele mysteriën, maar er zijn nu overtuigende bewijzen dat zij volkomen menselijk waren en deel uitmaakten van onze eigen soort. Een vooraanstaande paleontoloog, Bjørn Kurtén, heeft een roman geschreven over de Neanderthalers, om lucht te geven aan hypothesen over deze mensen die niet gestaafd konden worden door wetenschappelijke bewijzen. Kurtén beschrijft in *Dance of the Tiger* het volk der Neanderthalers als zachtmoedig en intelligent, en als genetisch dicht genoeg bij de meer recente 'sapiënte' Cro-Magnons om zich te vermengen. Dit paren in de andere groep zou de anders raadselachtige verdwijning van de Neanderthalers zo'n 35 000 jaar geleden kunnen verklaren, toen ze werden vervangen door de Cro-Magnonmens. Het is mogelijk dat het genetische materiaal van de Neanderthalers als het ware werd verzwolgen door de genen van de talrijkere Cro-Magnons.

De Neanderthalarmens gebruikte symbolen en abstracte notaties. Men vond met opzet gemaakte zigzagafbeeldingen en fijne evenwijdig gegraveerde lijnen op botten in vindplaatsen van de Neanderthalers, gelijksoortig aan de

markeringen die later verschijnen in de meer omvattende Cro-Magnoncultuur, met haar overdaad aan complexe symbolen en beelden. Kennelijk was het vermogen tot intellectuele bezigheden van hoog niveau al ver voor de eerste beschavingen aanwezig. Dit feit maakt het moeilijk het traditionele denkbeeld overeind te houden waarin de menselijke cultuur wordt gezien als een vooruitgang via geleidelijke groei, die ontstaat als gevolg van een langzaam toenemende geestelijke vaardigheid. De Britse archeoloog Clive Gamble stelde onlangs:

Het is niet langer voldoende de menselijke evolutie van de laatste 300 000 jaar te beschouwen als een proces van toenemende intelligentie en een verklaring te geven in termen van veranderingen in de hersenen.[...] Recent onderzoek heeft het bestaan aangetoond van geestelijke vermogens zo'n 300 000 jaar geleden, die gelijkwaardig zijn aan die van de moderne mens. De dramatische ontwikkelingen in de materiële cultuur, zoals de opkomst van de kunst, lijken nu nauwer te zijn verbonden met veranderingen in de hoeveelheid en het soort informatie dat paleolithische maatschappijen nodig hadden, dan dat ze afhankelijk zijn van de evolutie van de hersenen.

Alexander Marshack (Peabody Museum, Harvard University) gelooft dat de Neanderthaler een verscheidenheid van symboolsystemen gebruikte, die een goed gedefinieerde sociale structuur weerspiegelen en een besef van de natuur documenteren. Ze vormen het bewijsmateriaal dat de 'primitieve' mens, veel eerder dan eens werd gedacht, een abstraheringsvermogen bezat dat ver voorbij dat van een simpele werktuigmaker en jager reikte. Ze doen vermoeden dat de hersenen van Neanderthalers van dezelfde orde waren als de onze.

Enkele van Marshacks belangrijkste ontdekkingen kwamen voort uit het onderzoek van de bijzondere verzameling gesneden Cro-Magnonbeeldjes, in 1931 gevonden in een grot in Vogelherd (Zuid-Duitsland). Een groep beeldjes in de verzameling, met de radioactieve koolstofmethode gedateerd op 30 000 jaar v.Chr. of ouder, moet door de Cro-Magnonmens gemaakt zijn vóór de Neanderthalers van de aarde verdwenen. Marshack gebruikt geavanceerde technieken, waaronder infrarood en ultraviolet licht, om subtiliteiten van vakmanschap zichtbaar te maken die door eerdere onderzoekers over het hoofd waren gezien.

Door deze objecten onder een microscoop te bekijken, begreep Marshack dat ze voor gebruik waren gemaakt en dus niet alleen voor de sier dienden. Sommige droegen symbolische tekeningen. Een uit mammoetivoor gesneden paard was glad geworden door het lange betasten en meedragen. Uit de schouder was een hoek gesneden, blijkbaar voor symbolische doeleinden. Een ruw gesneden beeldje met vrouwenborsten droeg drie groepen tekens door verschillende gereedschappen gemaakt, wat vermoedelijk duidt op langdurig ritueel gebruik van het voorwerp. Op een beeldje van een paard of rendier, gedateerd op 29 000 jaar v.Chr., waren ingewikkelde geometrische patronen van meervoudige curven gegraveerd en verzamelingen rechte lijnen van verschillende lengten. Dit soort tekeningen komt in de IJstijd en daarna herhaaldelijk voor.

Marshack beschouwt de voorwerpen en hun tekeningen als deel van een ingewikkeld systeem van onderling verbonden beelden en abstracte notaties, dat gebaseerd is op een in stand gehouden traditie. Een uit een gewei of bot gesneden ovale schijf, zo'n 30 000 jaar oud en gevonden in de Dordogne, vertoont een hoogst intrigerende reeks gegraveerde tekeningen in de vorm van een kronkelige ketting die een lus maakt en zichzelf sluit. De tekens waren gemaakt met verschillende werktuigen, waarmee kennelijk op verschillende manieren was gedraaid en geslagen. Afgaande op zowel haar onderdelen als op de hele kronkelige omkransing was de figuur duidelijk gemaakt met de intentie een bepaalde betekenis over te dragen, diende ze als een instrument voor de opslag van een soort informatie, misschien mythische, sociale of een die te maken heeft met natuurverschijnselen. Voor het ontcijferen van de code is een sleutel nodig en dat roept een volgend lastig probleem op, want het is duidelijk dat er een behoorlijk geraffineerde communicatievorm moet zijn gebruikt om een codesleutel door te geven. De miniatuurafmeting van de gravure, die grote precisie vereist, doet een al stevig gevestigde traditie vermoeden en een groot zelfvertrouwen bij de graveur. In een primitief ontwikkelingsstadium zou een symbolensysteem zeker in een groter, onzekerder schrift zijn opgetekend. Marshack komt tot de conclusie dat er bewijs is voor het gelijktijdig bestaan van een aantal symboolsystemen, ruim voor de teloorgang van de Neanderthaler.

Marshack gelooft dat dergelijke codes geen schrift of rekenkunde zijn. Het schrift in de algemeen aanvaarde betekenis van het woord is niet ouder dan zo'n 6000 jaar en rekenkunde verscheen niet voor het einde van de laatste paleolithische periode, circa 10 000 jaar geleden. Maar de codes hebben een betekenis en een functie. De zigzagmarkeringen en golflijnen in de benen voorwerpen kunnen het bewijs zijn van een sjamanistisch symbolisme dat met water te maken heeft en met het gebruik van een waterbeeldentaal. Ze onthullen het vermogen de externe wereld op verschillende manieren te symboliseren.

Is dit darwinistische evolutie? Het heeft geen zin dergelijke openbaringen te bespreken in termen van overleving en geschiktheid, of van aanpassingsstrategieën, omdat de rijkdom van de beeldentaal en de symboliek zo veel groter lijkt dan nodig geweest zou zijn om de gevaren van de omgeving op het basisniveau van 'wel of niet creperen' het hoofd te bieden. Kennelijk nam de vroege mens diepzinniger vragen onder handen.

De traditie van het abstracte symbolisme die glanst op alle door archeologen teruggevonden stukjes been en gewei, die zich over zovele millennia uitstrekt en zo veel meer getuigt van verstandelijk onderzoek dan ooit werd vermoed, stijgt ver uit boven dat wat nodig is om in leven te blijven. Dergelijke ver uitgewerkte, geestelijke bezigheden kunnen niet slechts aanpassing zijn geweest. Marshack ziet de IJstijdcultuur als de *culminatie*, in plaats van als de genese,

van een culturele ontplooiing die haar weg had gevonden door een langdurig evolutionair tijdperk van misschien wel een miljoen jaar.

De opmerkelijke schilderijen van dieren in de paleolithische grotten van Frankrijk en Spanje, die ouder zijn dan 17 000 jaar en aanvankelijk werden afgedaan als oplichterij, zijn volgens hem niet uitzonderlijke, op zichzelf staande vuurwerken van artistieke luister, maar vertegenwoordigen een facet van meer wijdverbreide en meer continue symbolenmakende activiteiten. De abstracte notaties in andere gebieden van de opper-paleolithische cultuur zijn even indrukwekkend als de verrichtingen van een gevorderd intellectueel vermogen. Ze verschillen gradueel, maar niet van aard. Als de grotschilderingen de Rembrandts van het tijdperk zijn, vertegenwoordigen andere bewijzen van symbolisme de Leibnizen en de Newtons. Deze abstracties waren geen schrift; zij waren gebaseerd op geestelijke processen, even verfijnd als die welke aan het schrift ten grondslag liggen. Het is onwaarschijnlijk dat zulke complexe gedachten het gevolg waren van de jacht op dieren of het verzamelen van wortels en bessen. De paleolithische kunst barstte uit in de lofzangen van grotschilderingen als die in Lascaux en Pech Merle, omdat het zaad van de culturele - niet slechts kunstzinnige - revolutie veel eerder was geplant in de biologie van de voorouders van de mens. 'In de evolutie van dit "zwijgende" vermogen moeten we geïnteresseerd zijn,' zei Marshack 'Het is een gegeneraliseerd vermogen van hominiden dat echt heel ver teruggaat.'

Het idee dat het maken van werktuigen, de technologie van het in leven blijven, de drijvende kracht was achter de evolutie van intelligentie en taal, is zeer aanvechtbaar. Antropologen hebben in een immens stuk tijd de verrassende stagnatie opgemerkt van de werktuigennijverheid. De gegraveerde tekeningen op been, steen en klei, de zigzaggen en de golf- en rechte lijnen en krassen worden niet langer beschouwd als willekeurig gekrabbel, maar als hoogst georganiseerd en systematisch: als informatie. En ze worden steeds meer gezien als graadmeter voor het intellect in de meest volledige betekenis. In dit perspectief zijn codes, symbolen en regels primair, en is de praktische toepassing van dergelijke abstracte denkwijzen op de werktuigentechnologie secundair. De regels voor het maken van hulpmiddelen verfijnden zich weliswaar met de tijd, maar de geest van de vroege mens was op weg naar een soort kennis die oneindig algemener en begripsmatiger was dan nodig voor het soort utilitaire verplichtingen als het warm houden van het lijf en het gevuld houden van de maag.

De impuls achter de eerste volslagen, preklassieke beschavingen in het dal van de Tigris en de Eufraat, kwam in elk geval gedeeltelijk voort uit de behoefte van mensen bij wie de geest al zodanig gepredisponeerd was tot religie, kunst, symboliek en/of ritueel om dit alles meer uitgebreid uit te drukken. Een innerlijke drang en externe omstandigheden maakten het mogelijk dat de beschavingen van Mesopotamië, Egypte en de vallei van de Indus 'evolueerden'. In

velerlei opzicht waren deze factoren al immanent aanwezig in het bewustzijn van de mens uit het stenen tijdperk. De opkomst van landbouw en veeteelt, de produktie van meer voedsel dan nodig om alleen maar in leven te blijven in de vruchtbare uiterwaarden van brede rivieren met water in overvloed, dit alles werkte mee om het bestaan van gemeenschappen van mensen te ondersteunen die de naakte strijd om te overleven waren ontgroeid en hen in staat stelde aandacht te wijden aan culturele en sociale bezigheden. Toch is het duidelijk dat cultuur zich niet ontwikkelde als een toevallige bovenlaag op meer fundamentele grootheden als voedsel, klimaat en vervoer die gewoonlijk worden gegeven als redenen voor de opkomst van de preklassieke beschavingen.

De archeologe Jacquetta Hawkes schreef:

Een van de onderliggende effecten van deze materialistische interpretatie van de geboorte van een beschaving is de kennelijke onvermijdbaarheid ervan. Elk stadium sluit naadloos aan op het onmiddellijk eraan voorafgaande en de hele kroniek lijkt zich met volmaakte logica en nuchterheid te ontwikkelen. Toch weet men dat de beschaving niet onvermijdelijk was, want enerzijds hebben mensen op goed bevoeid en vruchtbaar land geleefd zonder een beschaving tot stand te brengen en anderzijds is dit wel gebeurd in duidelijk schrale omgevingen. Wat de logica en nuchterheid betreft: werd al deze, vanuit de overproduktie van voedsel stammende, voortgaande en opwaartse inspanning niet gewijd aan de wildste vluchten van de verbeelding - aan het opwerpen van kunstmatige bergen voor mensgoden en het samenvoegen van miljoenen tonnen rots in een volmaakt geometrische vorm om de lijken van godmensen te ontvangen?

Met al deze ordelijke economische en sociale constructies lijken we geconfronteerd te worden met zoiets als een auto zonder motor of een harnas zonder ridder. De dynamiek is afwezig.[...] door de materiële vooruitgang in voedselproduktie, technologie en de rest konden deze geestelijke vormen een nieuwe luister van uitdrukking vinden, om zich koninklijk te kleden. Het kan, gegeven het bewijsmateriaal, nauwelijks worden betwijfeld dat ze niet nieuw waren en tot op grote hoogte algemeen geldend voor het menselijke zelfbewustzijn dat reageerde op wat het in binnen- en buitenwereld aantrof.

Het verklaren van de oorsprong van deze grote bloei van de menselijke geest in externe termen heeft tegenwoordig het hoogtepunt van speculatieve waanzin bereikt met de hypothese van astronauten uit de oudheid: boodschappers uit een andere wereld, met informatie boven het geestesbereik van de primitieve mens, die in hun strijdswagens nederdalen om verlichting en cultuur te brengen aan de onbeschaafde geest. Achter deze fantastische kijk op de voor geschiedenis ligt de maar al te vertrouwde vooronderstelling dat de archaïsche mens geestelijk niet gevormd was en geen weet had van eenheidscheppende principes en relaties in het materiële universum. De these van astronauten uit de oudheid is behaviorisme, maar dan gedreven tot kosmische uitersten. Ze vooronderstelt dat de menselijke geest passief is en moet worden geleid, in plaats van dat ze in staat is tot vernieuwing in eigen termen, aanpassing in plaats van schepping, nabootsing, geen oorspronkelijkheid.

De Neanderthaler maakte werktuigen die aan weerskanten bewerkt waren, maar dat was niets schokkends. Hij gebruikte ook puntige stukken bot of hout, hij was het vuur meester, prepareerde huiden en bouwde hutten in kampen. Veel relevanter was de uniforme spreiding van zijn cultuur over drie continenten en de getuigenissen van rituele en symbolische praktijken. Toch is het bijna zeker dat hij niet de eerste was die zin voor schoonheid toonde, belang stelde in de betekenis van de dood en zich bewust was van het bovennatuurlijke - alle aspecten van de vroege psyche met gigantische implicaties voor de hogere vlucht van de beschaving die veel later zou komen. De archeologie breidt voortdurend de geschiedenis van het menselijke bewustzijn uit, verder terug in de tijd.

Het is niet nodig ons te verbeelden dat deze grote vorderingen van intellect en geest mogelijk werden gemaakt door geïmporteerde kennispakketten, aangevoerd in ruimteschepen door superieure wezens uit andere delen van de melkweg. Lang voordat de zichtbare sporen van cultuur te voorschijn komen uit de diepten van het paleolithische verleden, bezat de archaïsche mens de grondslag van hersenen die zo hoog waren georganiseerd, zo verscheiden, zo vol mogelijkheden, dat ze zijn ver verwijderde nakomelingen in staat zouden stellen in vurige strijdswagens van eigen makelij op ontdekkingsreis te gaan over de oeverloze oceaan der ruimte.

14. TAALBOODSCHAPPEN: HELDERHEID EN RUIS

Een evolutietheorie die geen rekening houdt met de interne structuur van de informatie in het DNA zal ineensinken onder de druk van nieuwe ontdekkingen en nieuwe ideeën in de zich snel ontwikkelende wetenschap van de moleculaire biologie. Ze zou niet rijk genoeg zijn om die ideeën en ontdekkingen in zich op te nemen. Op vrijwel dezelfde manier is een taaltheorie niet bij machte haar belangrijkste en wezenlijkste eigenschappen te begrijpen als zij zich slechts bezighoudt met de oppervlakteverschijnselen van het gesproken of gedrukte woord. Ze gaat geheel voorbij aan het onderwerp van taal als een menselijke activiteit.

In de informatietheorie is de boodschappenbron van primair belang. De bron kiest uit een verzameling mogelijke boodschappen een boodschap en codeert haar voor de transmissie naar een ontvanger, die een soort omgekeerde zender is. In dit proces zal zich wat ruis aan de boodschap hechten en haar verminken en verwarren. Alleen als de boodschap in de bron naar behoren is gecodeerd, kan ze de verwarrende effecten van ruis te boven komen, zodat de boodschap, wanneer ze op haar bestemming wordt gedecodeerd, haar oorspronkelijk bedoelde structuur en vorm behoudt.

Zo'n code moet wat afbreuk doen aan de vrijheid van de bron bij haar selectie van verschillende boodschappen als snelle en betrouwbare communicatie moet plaatsvinden. Maar een geslaagde code doet aan deze vrijheid op speciale, vernuftige manieren afbreuk, waardoor zo veel mogelijk door de zender behouden blijft. En de ontwerper van de code moet bij zijn zoeken naar de beste manier om deze taak te vervullen niet de waarneembare oppervlaktevorm van deze of gene specifieke boodschap in acht nemen, maar uitgaan van de diepere en algemenere structuurregels die tot het boodschappensysteem in zijn geheel behoren. Deze benadering wordt het best beschreven door Warren Weaver, in zijn klassieke commentaar op Shannons oorspronkelijke artikelen. Weaver zei, dat de informatietheorie zich bezighoudt met de 'werkelijk binnenste kern van het communicatieprobleem, met die fundamentele verbanden die algemeen gelden, los van de bijzondere vorm die een werkelijk geval kan aannemen'.

De huidige revolutie in de taalwetenschap, die een begin vond in de jaren vijftig, ruwweg samenvallend met de ontdekking van de genetische code, was een poging de universele principes van alle talen te onderzoeken door een gelijke route te volgen en diep onder de waarneembare oppervlakte van geuite zinnen te duiken naar de verborgen, abstracte structuren die eraan ten grondslag liggen.

Noam Chomsky is de oorspronkelijkste en invloedrijkste denker geweest in dit zoeken naar de onbewuste principes, de verborgen geestelijke bewerkingen die de menselijke taal schragen. Wat hij wil ontdekken zijn bovenal 'die

fundamentele verbanden die algemeen gelden'. Hij is sterk de mening toegedaan dat wat iemand zegt geen betrouwbare gids is naar iemands werkelijke, vaak onbewuste kennis; de kennis van taalpatronen als volledig systeem, de beheersing van al zijn mogelijkheden interesseren Chomsky het meest en een taaltheorie in de volle betekenis van het woord, dus wat gezegd *kan* worden, acht hij van meer belang dan wat werkelijk wordt gezegd. Chomsky's these is dat iedere spreker oneindig veel kan zeggen. In dit opzicht vertoont zijn werk een sterke affiniteit met dat van Shannon, in wiens theorie een enkele boodschap alleen van belang is vanuit het gezichtspunt van haar relatie met alle andere boodschappen die verzonden hadden kunnen worden, maar niet verzonden werden.

Au fond beschouwt Chomsky taal als een goed gedefinieerd systeem, voorzover dat haar vorm betreft. De input van het kanaal tussen spreker en luisteraar wordt 'gecodeerd' door een grammatica die mooi regelmatig en betrouwbaar is. Maar bij de verplaatsing van een boodschap, namelijk van de bron in de hersenen op haar reis naar de persoon voor wie ze is bedoeld, raakt ze op verschillende manieren vervormd. Aan de oppervlakte, in de vorm van taal, is de boodschap erg vaak rommelig, onvolmaakt en vol fouten. Zeker, taal is de overbrenger van boodschappen, maar die zijn vervormd door 'ruis', in de vorm van vergissingen, versprekingen, vergeetachtigheden, herhalingen en verwarringen. De ontvanger moet aan de boodschap betekenis geven, haar uit de ruis ontrafelen, haar reconstrueren in haar oorspronkelijke, niet-willekeurige vorm. Tenzij dat gebeurt, is communicatie onmogelijk.

Chomsky gelooft dat de ontvanger deze taak kan vervullen omdat er, onder de chaos van het oppervlakteverschijnsel van taal, abstracte zinsvormen bestaan die in Shannons termen de 'nuttige' informatie-inhoud van de boodschap bevatten. Op dit diepere niveau is de boodschap helder en expliciet, vrij van bederf door ruis. Een luisteraar ontdekt deze meer duidelijke, onbesmette boodschappen zonder erbij na te denken omdat hij, net als de spreker, in zijn brein dezelfde coderingsprincipes bezit. Als dat niet het geval was, zou een kind een taal nooit snel en gemakkelijk kunnen leren, maar moeten afgaan op de rommelige en entropische voorbeelden van de taal van volwassenen. Noodzakelijkerwijs moeten er meer abstracte principes werkzaam zijn, dichter bij de boodschappenbron in de hersenen van het kind zelf.

Door aan te nemen dat de oppervlaktestructuur van een zin de enige werkelijkheid is, merkten Chomsky's voorgangers, de Amerikaanse structuralisten, dat ze niet de meest opvallende eigenschap van taal konden verklaren: haar onbegrensde vermogen nieuwe gedachten en ideeën uit te drukken. Met Chomsky is dat heel anders. Zijn voornaamste, erkende doelstelling is het ontwerp van een taaltheorie die recht kan doen aan de onuitputtelijke frisheid en oorspronkelijkheid van taal, om, op een nauwgezette, exacte manier, haar creatieve genie te verklaren.

Op het eerste gezicht kan zijn benadering paradoxaal lijken. Chomsky besteedt veel aandacht aan orde, regelmatigheid en vorm. Syntaxis is zijn eerste zorg. Hij gaat diep in op alles wat we zijn gaan associëren met redundantie, de entropie-verlagende elementen in een informatiesysteem die boodschappen van ruis scheiden. Hij gelooft dat een taaltheorie zich alleen zou moeten bezighouden met een 'ideale' spreker/luisteraar, die zijn taal volmaakt kent en nooit vergissingen maakt, iemand die nimmer afwijkt van de grammaticale correctheid.

Chomsky maakt een kritiek onderscheid tussen wat hij 'competence' en 'performance' noemt. Competence is de onbewuste kennis die een spreker van zijn moedertaal heeft van alle, en slechts de welgevormde, zinnen in zijn eigen taal. De spreker zou al deze zinnen nooit werkelijk kunnen uiten, omdat ze grenzeloos talrijk zijn, maar aangezien hij elk daarvan zou kunnen zeggen als hij dat zou willen, rusten zij daar in de boodschappenbron als mogelijkheid. Anderzijds is performance het werkelijke gebruik van taal in de ontmoetingen van alledag tussen mensen; voor Chomsky, die gedrag op zich een nogal onvruchtbaar studieterrein vindt, is de performance dan ook veel minder interessant dan de competence.

De betekenis van de taal is niet altijd overduidelijk. Onder een geuite zin liggen abstracte structuren, waaraan de zin zelf slechts indirect gerelateerd is. Die structuren zijn in feite plannen of beschrijvingen van zinnen. Ze bestaan op meer dan een niveau en worden met elkaar verbonden door middel van regels. Als de betekenis van een zin op een niveau niet expliciet is, kan ze dat wel zijn op een ander niveau, waar de zinsdelen een andere volgorde kunnen hebben. Om de precieze relatie tussen zinsdelen als bedoeld door de spreker te verhelderen, zijn beide structuurniveaus nodig. Dit is de enige manier om betekenis te geven aan veel conversationele uitingen.

Een luisteraar kan dit verband begrijpen, omdat zijn eigen competence hem toegang geeft tot de regels die de performance-versie aan de oppervlakte verbindt met de andere, eronder liggende versies. De twee door Chomsky het meest als voorbeeld gebruikte zinnen:

John is easy to please
(John is gemakkelijk te behagen)

en

John is eager to please
(John is er tuk op om te behagen),

zijn aan de oppervlakte gelijksoortig, maar verschillen op een meer abstract niveau. De structuur onder de eerste zin zou in de trant kunnen zijn van

It is easy to please John
(Het is gemakkelijk om John te behagen)

terwijl de onderliggende structuur van de tweede zin de vorm zou hebben

John is eager to please someone
(John is er tuk op om iemand te behagen).

Omgekeerd zijn de zinnen die op het eerste gehoor heel verschillend zouden kunnen klinken

The man stopped the car
(De man stopte de auto)

en

The car was stopped by the man
(De auto werd gestopt door de man)

in feite twee versies van een enkele onderliggende structuur. De een wordt in de ander omgezet door middel van transformaties, taalkundige algoritmen; ze voeren bewerkingen uit op een niveau op een zinsvorm door elementen uit te wissen, ze om te zetten, of samen te voegen. Op deze wijze kan een actieve zin worden veranderd in een passieve, of een uitspraak in een vraag. Volgens deze theorie kan meerduidigheid, wat in feite een soort ruis is die de betekenis van de boodschap verduistert, worden opgelost door te refereren aan de structuur waarvan de boodschap een transformatie is.

In de linguïstiek van Chomsky, die voortdurend herziening en verandering ondergaat, genereert een verzameling basisregels een 'dieptestructuur', die het abstracte plan is van een zin. Dieptestructuur ligt het dichtst bij de betekenis die de spreker bedoelt en wordt het minst aangetast door vervormingen en dubbelzinnigheid. Het is de structuur waartoe alle andere structuren zijn te reduceren. Andere soorten regels, bekend als transformatieregels, veranderen dieptestructuur in oppervlaktestructuur die, hoewel eveneens abstract, de uiteindelijke vorm is van de zin voor haar omzetting in fysieke spraakgeluiden.

Onlangs is Chomsky gestopt met het gebruik van de term 'dieptestructuur', omdat ze veel mensen tot de verkeerde gedachte bracht dat taal op dat niveau letterlijk dieper is dan iets anders, wat niet het geval is. Hij liet ook de term 'oppervlaktestructuur' vallen, om bijna dezelfde reden: ze suggereert dat een zin in deze vorm de geuite zin is, die we een spreker werkelijk horen zeggen, terwijl de oppervlaktestructuur nog steeds een verre van concrete uiting is. Dieptestructuur wordt nu eenvoudigweg 'D-structuur' genoemd. Oppervlaktestructuur (in de nieuwe terminologie, 'S-structuur') is abstracter dan vroeger geworden en heeft een verrijkte informatieinhoud. Ze bevat een zweem van stille sporen van de D-structuur, waarvan ze een transformatie is.

Chomsky beweert dat wanneer een woordgroep van de ene plaats in de zin naar een andere verhuist door een transformatieregel, die woordgroep een stil residu, of 'spoor' nalaat op de oorspronkelijke plaats in de zin, zelfs in de S-, of oppervlaktevorm. Hij zegt dat de zin

Who do you want to choose?
(Wie wil je kiezen?)

bijvoorbeeld meerduidig is, omdat ze de S-vorm is van twee verschillende, meer expliciete, onderliggende D-reeksen, namelijk

You want to choose who. (1)

(Je wilt kiezen wie.)

You want who to choose. (2)

(Je wilt wie kiezen.)

Als ze de S-vorm is van reeks (1), zou een Amerikaanse spreker de woorden 'want to' kunnen samenvoegen en zeggen 'Who do you wanna choose?' Maar als ze de S-vorm is van reeks (2), zou zo'n weglating verboden zijn, omdat een ander woord, 'who', in de D-reeks ertussen staat. Evenmin zou een weglating van de woorden zijn toegestaan in een uitspraak als

Who do you want to see Bill?

(Wie wil je zien Bill?)

zelfs in deze S-vorm, hoewel de woorden 'want to' niet van elkaar worden gescheiden door een derde, tussenbeide komend woord. De reden daarvoor is dat de zin is afgeleid van de D-structuur

You want who to see Bill?

(Je wilt wie dat Bill ziet?)

waar weer een ander woord staat tussen 'want' en 'to'.

Chomsky beweert dat, hoewel het woord 'who' door transformaties van zijn oorspronkelijke D-structuur verdwijnt, het toch een stil spoor achterlaat in de S-vorm, zodat het spoor effectief 'want' van 'to' scheidt, zelfs al is dat een onhoorbaar, onstoffelijk surrogaat:

Who do you want to choose (spoor)?

Who do you want (spoor) to see Bill?

In de laatste weglating is 'wanna' niet toegestaan. Het spoor dat tussenbeide komt om het ontoelaatbaar te maken, is denkbeeldig in termen van geluid, maar werkelijk in syntactische termen. Het betekent dat vanuit het gezichtspunt van syntaxis, van structuur alleen, de zin meer nuttige informatie bevat dan we hadden kunnen denken.

Chomsky beschouwt taal als een zeer efficiënt systeem voor informatieverwerking omdat, hoewel het spreken zelf ongeordend en aangetast kan zijn, net eronder regelmaat en orde liggen. De grammatica, onderdeel van de competence, werkt als een filter dat fouten en onjuiste woordgroeperingen eruit

haalt, door een spreker te laten zien welke zinsvormen toelaatbaar zijn en of ze met bepaalde andere zinsvormen verbonden zijn door transformatieregels. Taal wordt daarom bij de bron al tegen willekeur beschermd, wat haar een grote stabiliteit geeft en helpt haar begrijpelijk te houden, zelfs wanneer ze wanordelijk is op het oppervlakteniveau. Dit is per slot van rekening een eerste vereiste van elk informatiesysteem dat zijn boodschappen onvoorspelbaar kan variëren, maar dan wel volgens bepaalde specifieke regels en voorwaarden.

Grammatica is een anti-toevalsinstrument, dat zinnen regelmatig en wetsgetrouw houdt. Ze is een systematische code die wordt toegepast bij de boodschappenbron. Maar er zijn miljoenen mogelijke grammatica's, alle verschillend van elkaar, die gekozen hadden kunnen worden door degene die taal verwerft. Deze andere grammatica's, indien gekozen, zouden leiden tot fouten en verwarring, omdat ze dan niet zouden samenvallen met de grammatica's van de andere sprekers. De 'keuzevrijheid' van de boodschappenbron moet op een speciale manier worden beperkt, zodat de correcte grammatica wordt gekozen, en alleen die, zonder dat het bewuste denken er noemenswaardig aan te pas komt. Deze restrictie wordt opgelegd door een ander soort anti-toevalsinstrument, een dat algemener is en garandeert dat de boodschappen vóór hun verzending op precies de goede manier gecodeerd worden. Chomsky noemt dit instrument de universele grammatica. Als een aangeboren predispositie die het een kind mogelijk maakt zich de competence in een taal vlug en zonder een planmatige instructie te verwerven, laat de universele grammatica bijna niets aan het toeval over. Hierdoor leren kinderen een taal met redelijk uniform gemak en snelheid, ondanks grote verschillen in de intelligentie. Als het hoogste codeerprincipe is het gelokaliseerd bij de boodschappenbron, in dit geval in de hersenen en niet daarbuiten. Eerder door noodzaak dan door toeval, bepaalt het dat de 'fundamentele relaties' die ten grondslag liggen aan de taalstructuur zullen gelden tussen de ene en de andere converserende persoon.

Een kind luistert naar het taalgebruik van volwassenen, maar dat taalgebruik is performance, geen competence. Er ligt een laag willekeur en rommel op. Wat meer is: de voorbeelden van de grammaticale regels die het kind hoort, zijn onsystematisch zodat, als taalverwerving een kwestie zou zijn van het nabootsen van zinnen die anderen spreken, of van het raden naar algemene principes op basis van brokken en flarden gegevens, het kind dan erg veel geluk zou moeten hebben of erg slim zijn, of allebei, om erin te slagen zijn moedertaal te beheersen in zo'n korte periode. Het is echter duidelijk dat geluk niet nodig is. De spraakontwikkeling bij jonge kinderen varieert onderling niet opvallend. Wat slimheid betreft is er geschat dat een IQ van slechts ongeveer 50 genoeg is om zich de moedertaal te verwerven.

Zoals Chomsky de universele grammatica beschrijft, is ze niet een grammatica op zich, maar een theorie van grammatica's in het algemeen, een verzameling hypothesen erover. Het is een waarneming - en dit is een herhaling waard - dat de hele kwestie van elke theorie, of het nu in de taalkunde is of in de natuurkunde, erop neerkomt dat ze niet alleen het beperkte aantal reeds

bekende feiten verklaart, maar het bestaan voorspelt van andere nog onbekende feiten. Kortom: een theorie genereert nieuwe informatie. Ze formeert veel kennis uit weinig gegevens. Vanuit de spaarzame en chaotische informatie die wordt gegeven in de vorm van volwassen taalgebruik, belanden kinderen als het ware in één sprong, in plaats van via een langzaam en pijnlijk leer- en instructieproces, bij de grammatica van hun eigen taal, omdat een grammaticatheorie in hun hoofd zit als een gave van de natuur.

Dit leidt dan weer naar een verklaring waarom taal onuitputtelijk is in haar vermogen nieuwe boodschappen te genereren en nieuwe betekenissen over te brengen. De informatie die een spreker kan overbrengen is veel rijker dan de informatie die kan worden verkregen door te luisteren naar het spreken van anderen. De output van de spreker is onvoorspelbaar, in die zin dat ze niet helemaal extern is te verklaren in termen van de input van ervaring, hoewel ze wezenlijk systematisch en regelmatig is en ze de regels van het taalspel gehoorzaamt, evenals dat het geval is bij alle andere sprekers.

Waarom dat zo moet zijn, is een vraag die, in vele verschillende vormen, wijsgeren eeuwenlang heeft beziggehouden. In de achttiende eeuw werd ze rechtstreeks onder handen genomen door Immanuel Kant, die geloofde dat kennis begint met de ervaring van de wereld, maar niet helemaal op die manier wordt bepaald. Een gedeelte ervan is *a priori*, eerder gegeven, geleverd door een geestelijk vermogen dat geen verband houdt met een bepaalde ervaring.

Kant karakteriseerde zijn these als een copernicaanse revolutie, omdat hij dacht dat ze te vergelijken was met de ontdekking dat, wanneer we de zon van plaats aan de hemel zien veranderen, het niet de zon is die beweegt, maar wijzelf. Hoewel Chomsky's zienswijzen op het moment zeker niet aanvaard zijn door alle, zelfs niet door het merendeel van de taalkundigen, kan van hem gezegd worden dat hij zijn eigen copernicaanse revolutie is begonnen door voor te stellen dat taalkennis voor een groot deel van binnenuit opkomt, in plaats van van buitenaf; het is deze interne kennis die we zullen moeten onderzoeken.

Volgens Kant bestaan er drie soorten ware uitspraken. De eerste soort is analytisch en *a priori* en heeft geen hulp van de ervaring nodig. In de zin 'Alle vrijgezellen zijn ongetrouwde mensen' wordt het predikaat al door het onderwerp geïmpliceerd. De waarheden uitgedrukt met dit type zinnen zijn universeel en noodzakelijk. De tweede soort waarheid is synthetiserend, dat wil zeggen dat het predikaat niet logisch in het onderwerp besloten ligt, maar er iets *a posteriori* aan toevoegt, uit de ervaring, door in de wereld feiten waar te nemen en erover te generaliseren. Deze extra kennis, geïmporteerd uit het 'buitenland' van de geest, is echter niet zeker, maar slechts waarschijnlijk waar, aangezien de materiële wereld zo vol is van verscheidenheid en verandering. Ze is niet helemaal voorspelbaar. De uitspraak 'Alle eenden kwaken' raakt in het ongereide bij de ontdekking van een enkele eend die spint.

Een derde soort waarheid noemde Kant het synthetiserende *a priori*. Hier voegt het predikaat nieuwe kennis toe, maar de kennis komt niet van buitenaf,

van de onbetrouwbare ervaringswereld. Ze is een bijdrage van de geest en ze is zowel universeel als noodzakelijk in plaats van plaatselijk en toevallig. 'Materie kan in energie worden omgezet volgens de vergelijking $E = mc^2$ ', is een zin van deze derde soort.

Het punt is dat het eerste type uitspraak, het analytische *a priori*, geen nieuwe informatie verschaft. Het predikaat is redundant, omdat het al in het onderwerp aanwezig is. Maar bij het tweede en derde type wordt de informatie die in het onderwerp is vervat, verrijkt: in het ene geval door onzekere, toevallige ervaringskennis, in het andere door bepaalde kennis uit zuiver geestesinzicht. Synthetiserende *a priori*-waarheden zijn het produkt van abstracte regels die de gegevens van de werkelijkheid organiseren, in plaats van die werkelijkheid eenvoudig toe te staan zich in de geest in te prenten, zoals bij een film in een camera. Kant verklaart:

We moeten de universele natuurwetten niet zoeken door middel van de ervaring, maar andersom: we moeten de natuur zoeken in haar universele gehoorzaamheid aan wetten, in de in ons gevoel en in ons verstand liggende voorwaarden voor het opdoen van ervaringen.

Chomsky behoort tot de Kantiaanse traditie in zoverre dat hij fundamenteel vasthoudt aan het geloof dat taalkennis, en waarschijnlijk ook andere soorten kennis, onvergelijkelijk uitgebreider, systematischer en rijker zijn dan de input van de ervaring. Er bestaat een wanverhouding tussen de hoeveelheid informatie die de geest opneemt en de hoeveelheid die hij afgeeft in de vorm van taal. Deze wanverhouding wordt niet extern verklaard in termen van gedrag maar intern, in termen van principia die niet van toeval afhankelijk zijn maar bepaald, niet aangeleerd maar aangeboren, niet *a posteriori* maar *a priori*.

Een verklaring van deze principes zou zeer abstract en algemeen zijn. Chomsky zoekt naar een 'taalonafhankelijke' taaltheorie. De wijze van zoeken komt sterk overeen met de manier waarop Lila Gatlin is begonnen met de ontwikkeling van een 'organisme-onafhankelijke' organismetheorie die is gebaseerd op theorema's uit de informatietheorie en die het mogelijk maakt universele wetten toe te passen op alle soorten informatiesystemen en het tevens mogelijk maakt hun structuur te onderzoeken. Chomsky schrijft:

Hoe abstracter de principes, hoe dieper ingebed in een bijzondere theoretische structuur en verder verwijderd van de verschijnselen, des te interessanter en belangwekkender is de taalstudie.

Controversieel als dit gezichtspunt in de linguïstiek mag zijn, het is vertrouwd genoeg in de natuurkunde, waar een aantal van de meest verhelderende resultaten is bereikt met zeer abstracte begrippen - denkbeeldige ruimten, complexe getallen, niet commuterende algebra's - die geen modellen zijn van de fysieke

werkelijkheid, maar geestelijke constructies. In zijn latere periode was Einstein een warm voorstander van deze benadering van de waarheid en maakte hiervan de grondslag van zijn wetenschapsfilosofie. Tijdens verschillende fasen van zijn loopbaan hield hij er verschillende meningen omtrent het vraagstuk in hoe verre geestesconstructies verband houden met zintuiglijke bewijzen, maar in zijn latere jaren bleef hij stevast bij de visie dat een formele theorie niet de ervaringsfeiten beschrijft, maar vrijelijk wordt uitgevonden door de geest. Hierdoor kunnen werkelijkheidsuitspraken afgeleid worden uit deze geestelijke uitvinding. Een volledig gelijkgeschakelde theorie van alle natuurkrachten, de gouden medaille die Einstein zonder succes tot zijn dood zocht, zou wetten nodig hebben van een grote algemeenheid en abstractie en deze wetten zouden eenvoudig zijn, vol schoonheid en ver van de werkelijke ervaring. Ze zouden de ervaring ontstijgen door alle natuurkundige 'feiten' over de wereld te genereren, inclusief die welke niet waarneembaar zijn. Einstein schreef in november 1930 in een brief:

Ik zeg het je ronduit: natuurkunde is de poging tot de begripsmatige constructie van de *werkelijke wereld* en van haar wetmatige structuur. Om zekerheid te bieden moet ze exact de empirische relaties weergeven tussen die zintuiglijke indrukken waarvoor wij openstaan, maar alleen *op deze manier* wordt ze eraan geketend [...] kortom, ik lijd onder het vage onderscheid tussen Werkelijkheid van de Ervaring en Werkelijkheid van het Zijn.

De door Chomsky voorgestelde taaltheorie heeft daarom heel veel gemeen met Shannons informatietheorie. Ze richt zich op de bron, in plaats van op de output en op het boodschappensysteem als een geheel in plaats van op de afzonderlijke boodschappen. Haar voornaamste doel is de ontdekking van de universele principes die van toepassing zijn op taal in het algemeen en het doen van voorspellingen over de taalstructuur op basis van deze principes. Dit betekent dat we van de theorie kunnen verwachten dat ze samenhangend is, toetsbaar en van toepassing op taal in het algemeen, niet slechts op deze of die bepaalde taal. Het werk van Chomsky heeft, net als dat van Shannon, zijn wortels in de wiskunde, de meest abstracte van alle wetenschappen, de verst verwijderde van concrete betekenis en de textuur van ervaring, hier en nu, in de werkelijke wereld. Zijn uitgangspunt is de theorie van de recursieve functies: een recursieve taalregel kan telkens weer worden toegepast op hetzelfde eindige aantal elementen, om een oneindig aantal verschillende zinnen te genereren. Hierdoor kunnen we de relatie tussen diepte- en oppervlaktestructuur zien als die van een recursieve functie, in de speciale, wiskundige betekenis van het woord.

Shannon is geïnteresseerd in patroon, relatie, orde, foutenbeheersing, de betrekkingen tussen willekeur en niet-willekeur. Ook bij Chomsky verschijnen deze begrippen steeds weer. Ze kenschetsen zijn wijze van benadering. Hij deelt met Shannon de voorkeur om vorm te scheiden van betekenis en de vormstudie nieuwe waarheden over taal te laten onthullen. Dit is de basis van zijn unieke plaats in de geschiedenis van de taalkunde.

15. EEN SPIEGEL VAN DE GEEST

Een moderne taaltheorie maakt, door haar aard, deel uit van een algemenere theorie over hetgeen de geest weet en waarom hij meer blijkt te weten dan hem is geleerd. De principes van de transformationele grammatica die in het vorige hoofdstuk werden geschetst zijn nauw verenigbaar met de ideeën van de moderne psychologie, die aanneemt dat er informatieverwerkende structuren bestaan op meer dan één niveau in het brein, waarvan sommige dicht bij bewuste expressie liggen dan andere. Aangezien het gedrag van de geest aan de oppervlakte een erg verdraaide en misleidende versie kan zijn van zijn gedrag op diepere en meer abstracte niveaus, moeten psychiaters hun eigen regels toepassen om informatie op het ene niveau te 'transformeren' naar informatie op het andere.

Chomsky houdt vol dat de taal een 'spiegel van de geest' is. Daarmee bedoelt hij dat elke vooruitgang naar een vollediger begrip van wat er werkelijk gebeurt wanneer mensen taal gebruiken, ons nader moet brengen tot een theorie van onbewuste menselijke kennis. Van alle moderne wetenschapsbeoefenaars is Chomsky als auteur de meest verfrissende en intellectueel de meest bevredigende, zelfs wanneer zijn ideeën zo krachtig zijn geformuleerd dat ze hem blootstellen aan beredeneerde scherpe kritiek. Dat komt omdat hij van meet af aan duidelijk heeft gemaakt dat als de linguïstiek doelstellingen nastreeft die marginaler zijn dan die van een dieper inzicht in het wezen van de geest, hij er liever niets mee te maken zou hebben.

In één opzicht behoort Chomsky, hoewel bijna altijd omschreven als een revolutionair, duidelijk tot de traditie van de linguïstiek zoals die meer dan een halve eeuw geleden in Verenigde Staten werd beoefend. In het hart van die traditie ligt het geloof dat een taaltheorie zo wetenschappelijk en precies mogelijk dient te zijn en alle vage of metafysische noties dient te vermijden. Aldus concentreerden de taalkundigen vóór Chomsky zich op taalaspecten die wetenschappelijk hanteerbaar leken. Toen de linguïstiek in de jaren twintig in de Verenigde Staten een academische discipline werd, koos ze voor een speciale bestudering van de fonologie, de klank van woorden. Klanken konden worden beschouwd als formele eenheden, zoals de x-en en de y-en in de algebra. Zij zijn de 'primaire substantie' van taal, klein in aantal, een eindige verzameling objecten die een wetenschap zou kunnen opsommen, van aanduidingen voorzien en op bepaalde manieren combineren, volgens bepaalde regels. Fonologie was zeer abstract, maakte de studie van taal exacter en bracht haar dicht bij de wiskunde en de wiskundige logica. Naarmate de linguïstiek zich ontwikkelde, verplaatste ze zich van de klankleer naar de leer van de woordstructuur, ofwel de morfologie, en vandaar naar de syntaxis, de leer van de zinstructuur. Dit was een heel natuurlijke ontwikkeling en alle drie benaderingen hadden één kenmerk gemeen: ze waren context-vrij, beschouwden taal als vorm en patroon en hielden betekenis op een afstand.

Ook Chomsky mikt op een wetenschappelijke taaltheorie, in die zin dat ze voorspellingen doet die op waarheid of-onwaarheid te toetsen zijn. Hij studeerde aan de universiteit van Pennsylvania bij de Amerikaanse structuur-linguïst Zellig Harris, die niet alleen het binnendringen van de betekenis in de taalwetenschap betreurde, maar ook alle moeite deed haar volledig buiten te sluiten door het gebruik van mechanische beschrijvingsmethoden die de computers, toentertijd nog niet zo slim, konden verwerken. Hoewel Chomsky zelf zich volledig bewust is van het belang van betekenis, erkent hij ook hoe ongrijpbaar ze is, hoe ze altijd weer in nieuwe contexten overstroomt en verward raakt in kwesties van interpretatie, gebruik en subjectieve, persoonlijke ervaring. Het veld van de linguïstiek is bezaaid met mislukte pogingen betekenis in een enkele theorie te vangen. Zo besloot ook Chomsky die aspecten van betekenis die voorbij de syntaxis liggen en voorbij de taal zelf, ter zijde te schuiven, om zich te beperken tot een speurtocht naar diepe, algemene structuurprincipes.

Met zijn geloof dat studie van de taalstructuur kan leiden tot ontdekkingen over de verborgen structuren van de geest, breekt hij echter duidelijk met het verleden. Zijn voorgangers hadden nooit iets dergelijks geclaimd. Ze waren vast de mening toegedaan dat de linguïstiek zich zou moeten beperken tot wat rechtstreeks waarneembaar is, namelijk oppervlaktegedrag. In dit opzicht liepen de linguïsten van vóór Chomsky opvallend uit de pas met de hoofdstroom van ideeën in andere wetenschappen, in het bijzonder in de natuurkunde, die grote vorderingen had gemaakt in de ontsluiting van de natuur door nieuwe waarheden af te leiden over de niet-waarneembare eigenschappen van het atomaire domein, uit theorieën gebaseerd op de waarneembare eigenschappen.

Chomsky oppert dat onder de oppervlaktevariëaties van de talen van de wereld abstracte principes en regels liggen die universeel zijn. En ze zijn niet universeel omdat ze toevallig de redelijkste en handigste zijn, evenmin omdat ze in de geschiedenis van de taal werden gevormd door middel van de een of andere consensus of traditie. Al deze factoren zijn extern ten opzichte van taal en toevallig. De universalia die Chomsky van belang acht, zijn die welke *noodzakelijkerwijs* in de taal bestaan omdat ze in de geest geprogrammeerd zijn door de informatie in het DNA. Er zijn veel soorten universalia, maar de soorten die hij ter bestudering kiest zijn heel formeel en hebben te maken met regels en de manier waarop die regels de zinsstructuur bepalen; zij geven ons waardevolle informatie over de geesteseigenschappen.

De kennis van de grammaticale regels bij een spreker is onbewust en dit betekent dat het uiterst moeilijk is om regels in een taaltheorie expliciet te maken. Omvangrijke aspecten van een gewone grammatica, in de volle betekenis van deze term, zijn nog steeds *terra incognita* voor de linguïst. De reden waarom het zo lastig is dit onbewuste regelsysteem te beschrijven, is dat de regels niet logisch zijn, maar psychologisch. Ze zijn karakteristiek voor de menselijke geest. Ze zijn doorgaans niet vanzelfsprekend: de ontdekking van een universeel principe komt vaak als een verrassing. Later zullen we zien hoe een formidabele klus het is andere vormen van onbewuste kennis expliciet te

maken, in het bijzonder kennis van het geheugen, het proces waardoor informatie wordt opgeslagen in de hersenen en getransformeerd tot bewuste informatie wanneer de behoefte daartoe opkomt.

Onbewust gekende grammatica's heten 'psychologisch werkelijke' grammatica's. Als we ze helemaal bewust zouden kunnen maken - en dat probeert een linguïst - zouden zij leiden tot een beter begrip van het probleem hoe het mogelijk is dat mensen zulke ver ontwikkelde vormen van kennis verwerven en waarom juist die speciale, bijzondere vormen en niet andere. Een grammatica, als systeem voor de beschrijving tot in het kleinste detail van elke goed gevormde zin in een taal, is een zeer verfijnd informatie-instrument dat boodschappen binnenlaat en ruis buitensluit. Maar ze is slechts een van een oneindig aantal mogelijke grammatica's. Ze wordt gekozen omdat ze verenigbaar is met de aangeboren en algemenere principes van de universele grammatica, die een metatheorie is van taal in het algemeen, en omdat de andere myriaden hypothetische grammatica's niet verenigbaar zijn.

Universele regels van de soort die Chomsky beschrijft komen op omdat andere, verschillende regels worden uitgesloten door beperkingen die van oorsprong genetisch zijn. Dit leidt tot een aantal interessante en zeer omstreden conclusies. Het betekent dat het unieke informatiesysteem dat bekend staat als taal mensen bereikt, vrijwel los van hun wel-of-niet willen. Het is even natuurlijk als de aanwezigheid van armen en benen, een prestatie waarmee waarschijnlijk niemand ons zal feliciteren, aangezien armen en benen zich in hun ontwikkeling alleen houden aan het plan van de biologie. Inderdaad moet een kind zich onderdompelen in taal en zich oefenen in het spreken. Maar dit is analoog aan de fysieke ontwikkeling, waarvoor het ook voeding nodig heeft en de ervaring van het lopen en rennen als zijn lichaam zich sterk en gezond wil ontwikkelen.

Als deze hypothese juist is, zit er iets paradoxaals in linguïstische kennis. Het feit dat een mens benen zal hebben, ongeacht of hij die nu probeert te laten groeien, geeft hem een bepaalde vrijheid, aangezien hij in belangrijke mate van hulp van anderen onafhankelijk is. Hij heeft geen advies of richtlijnen nodig voor de regels van beenontwikkeling. Maar in een ander opzicht is hij sterk beperkt. Hij heeft niet de vrijheid vleugels of een staart te laten groeien, zelfs als hij dat zou willen. De informatie in zijn genen specificceert benen, en benen zal hij krijgen. Met taal gaat het ongeveer net zo. De universele grammatica zorgt ervoor dat er natuurlijke en onnatuurlijke regelsystemen zijn; de tweede categorie is ontoegankelijk, staat buiten spel. Het staat benen, zoals talen, vrij van elkaar te verschillen op verhoudingsgewijs oppervlakkige manieren. Ze zijn er in veel verschillende vormen en maten: sommige zijn aardiger om te zien dan andere. Maar gezien uit het oogpunt van de biologie zijn de punten waarop zij niet verschillen van meer belang dan de punten waarop ze wel verschillen.

Beperkingen vormen een wezenlijk onderdeel van elk proces waarin orde waardevol is. Een thermodynamisch systeem kan niets nuttigs doen als al zijn delen zich vrijelijk en op alle mogelijke manieren kunnen groeperen. Zijn entropie is dan maximaal en zijn energie ontoegankelijk. Om arbeid te verrichten moet de entropie van het systeem verminderen en dit betekent beperking van het aantal geoorloofde groeperingen van zijn onderdelen. De informatietheorie maakt eveneens duidelijk dat als symbolen willekeurig, in elke volgorde, aaneen te rijgen zijn, de boodschappen die ze voortbrengen niet begrijpelijk zullen zijn en evenmin beschermd tegen fouten. Ook in de biologie zijn bepaalde restricties gesteld aan de vrijheid van de boodschappenbron, het DNA. Levende organismen delen met chomskyaanse taalstructuren wel degelijk de eigenschap niet vrij te zijn om elke willekeurige vorm aan te nemen. Regels, opgeslagen in het informatiesysteem van het DNA, zijn verantwoordelijk voor de rijke complexiteit van het lichaam en de hersenen. Zij zijn de grammatica van de genetische taal. Maar deze regels worden in de hand gehouden door andere regels op een hoger logisch niveau. Ze moeten legitieme levensvormen voortbrengen, geen monsters. Men kan zich de meest bizarre scheppingen der natuur voorstellen, van het soort dat de science fiction bevolkt, maar ze blijken niet-grammaticaal te zijn volgens de regels opgeslagen in het DNA, hoewel ze in principe zijn toegestaan door de wetten van aanpassing van de klassieke evolutietheorie. 'Waarom zijn er geen organismen op wielen?' vraagt de geneticus Richard Lewontin. Boyce Rensberger verschuift die vraag naar een verder liggend stadium:

Wat nog belangrijker is, waarom bestaan er geen gewervelde dieren met zes poten? Veel evolutiedeskundigen denken dat het antwoord op dergelijke vragen weleens verbonden zou kunnen zijn met het ontstaan van de soorten.

Het klassieke darwinistische antwoord is dat zulke zaken best zouden kunnen opkomen, maar alleen als ze het vermogen van een organisme om in zijn natuurlijke omgeving tot volledige ontplooiing te komen zouden verbeteren. Het feit dat bepaalde denkbare organismen onbekend zijn weerspiegelt de keuzevoorkeur van de omgeving, of eenvoudig het feit dat de vereiste mutaties zich nooit hebben voorgedaan.

Veel hedendaagse biologen denken dat het antwoord heel wat complexer moet zijn, of totaal anders. Een alom genoemde factor heeft te maken met beperkingen, inherent aan de embryologische ontwikkeling van een organisme. Er schijnen natuurlijke wetten te bestaan die de manier bestuderen waarop cellen zich samenvoegen tot gespecialiseerde weefsels. Niemand kent die wetten, maar ze schijnen de embryologische ontwikkeling in bepaalde patronen te kanaliseren.

In de theorie van Chomsky spelen beperkingen een alles overheersende rol, wat de reden is waarom ze vaak een theorie lijkt te zijn van wat een spreker *niet* kan doen met taal, in plaats van wat hij er *wel* mee kan doen. De universele grammatica beperkt regels op verschillende manieren en die beperkingen zijn vaak erg onvoorspelbaar, zodat we tegen ze aanlopen met het gevoel een echte ontdekking te hebben gedaan. Bepaalde talen, zoals het Engels en het Nederlands, gebruiken dit type constructie van een betrekkelijke bijzin:

The man *that I saw* was your brother.
(De man *die ik zag* was jouw broer.)
I read the book *that you read*.
(Ik lees het boek *dat jij leest*.)

Andere talen, bijvoorbeeld het Hebreeuws, voegen een extra voornaamwoord toe. In de vertaling zouden de Hebreeuwse zinnen er zo uitzien:

The man *that I saw him* was your brother.
(De man *die ik zag hem* was jouw broer.)
I read the book *that you read it*.
(Ik lees het boek *dat jij leest het*.)

De beperking op het vormen van bijzinnen wordt werkelijk interessant wanneer we merken dat het Engels ook sporen van de Hebreeuwse strategie bevat. Ook veel streekdialecten van het Frans nemen de Hebreeuwse vorm aan met het extra voornaamwoord. Bepaalde informele, conversationele constructies in het Engels doen dat ook. Smith en Wilson geven de volgende voorbeelden:

That's the kind of answer *that*, (when you come to think about it,) *you find you've forgotten it*.

This is the sort of book *that*, (having once read it,) *you feel you want to give to all your friends*.

Een eenvoudig voorbeeld van een universele regel is wat Chomsky noemt de 'structuurafhankelijkheid' van taal. Structuurafhankelijkheid betekent dat taalregels zich niet bemoeien met de woordvolgorde in een zin, maar met de structuur van de hele zin, zelfs als daartoe geen duidelijke behoefte bestaat. Dit is een van de redenen waarom een syntaxis-theorie zo ingewikkeld is. We kunnen bijvoorbeeld de Engelse zin

The tall, blond man with one black shoe is running

transformeren in

Is the tall, blond man with one black shoe running?

door een ogenschijnlijk eenvoudige regel toe te passen die het woord 'is' naar het begin van de zin verplaatst. Toch is deze regel niet zo simpel als ze eruit ziet. Wat gebeurt er als het woord 'is' meer dan een keer voorkomt? Veronderstel dat de zin luidt

The tall, blond man, who is wearing one black shoe, is running.

Verplaatsing naar voren van het eerste 'is' levert een niet-correcte vorm op:

Is the tall, blond man who wearing one black shoe is running?

De regel werkt door te letten op de structuur van de zin, niet op de woordvolgorde. Ze beschouwt

The tall, blond man who is wearing one black shoe

als een enkele eenheid, laat die intact en verplaatst het eerste 'is' dat deze eenheid volgt naar voren. Logisch gezien is zo'n regel in een taal niet noodzakelijk. Evenmin is het de eenvoudigste om te leren. Maar structuurafhankelijkheid is een eigenschap van de universele grammatica en daarom kan geen taalregel de structuur onverschillig zijn.

Andere soorten relaties tussen woorden zijn ook verboden om geen andere duidelijke reden dan dat ze principes zouden schenden, eigen aan de menselijke geest en verankerd in de menselijke genen. Een recenter en geraffineerder voorbeeld van dit verschijnsel is de ingebede woordgroep in een indirecte zin, waar een deel van de woordgroep soms kan ontbreken en de zin toch nog correct kan zijn. Je kunt bijvoorbeeld zeggen

It is unclear what to do
(Het is onduidelijk wat te doen)

waar het onderwerp van 'what to do' afwezig is. Als het onderwerp aanwezig zou zijn, zou de zin luiden

It is unclear what someone does.
(Het is onduidelijk wat iemand doet.)

Als het onderwerp eenvoudig weggelaten zou worden om de verkorte vorm te maken, zou de zin worden

It is unclear what does
(Het is onduidelijk wat doet)

wat niet hetzelfde betekent. Wanneer alle mogelijkheden worden onderzocht, blijkt dat het enige deel van een ingebede woordgroep dat kan worden gemist het onderwerp van een infinitief te zijn. Dit soort beperkingen verschijnt uitermate vaak in allerlei talen van de wereld, veel vaker dan we zouden aannemen en de algemene principes die dat verklaren zijn, voor zover we weten, universeel.

De universele grammatica is het aangeboren anti-toevalsinstrument in de heren dat de syntaxis op deze manier beperkt. Toen zijn ideeën zich verder ontwikkelden, merkte Chomsky alleen dat de transformatieregels, zoals hij ze oorspronkelijk had voorgelegd, te veel keuzevrijheid laten aan hen die ze leren; die vrijheid moet nog strikter worden ingeperkt.

Transformatieregels op zichzelf zijn anders dan de universele grammatica, niet aangeboren. Ze worden echter gemakkelijk verworven, omdat iemand die een taal leert, voorbereid is ze zorgvuldig te kiezen door de metatheorie van de universele grammatica, die alle soorten transformatieregels uitsluit, behalve de correcte.

Maar zelfs als de metatheorie een kind leidt bij de selectie van de juiste regel, hoe moet het deze dan vlug verwerven als de regel zelf complex en moeilijk is? De regel bijvoorbeeld, die een actieve zin in de dieptestructuur transformeert in een passieve zin in de oppervlaktestructuur, waarvan men eens dacht dat ze de meest fundamentele en vastliggende was, werd het vervelendst van alle door haar omslachtige, bijna koddige machinerie. Het omzetten van de actieve zin

The hunter shot the fox
(De jager schoot de vos)

in de passieve zin

The fox was shot by the hunter
(De vos werd geschoten door de jager)

vraagt de verplaatsing van twee zelfstandige naamwoordgroepen, de toevoeging van een hulpwerkwoord, de toevoeging van het woord 'door' en het scheppen van een prepositionele woordgroep die uit de lucht komt vallen. Al deze veranderingen werden verondersteld te zijn bewerkstelligd door een enkele transformatie. Het is niet erg waarschijnlijk dat een kind in staat zou zijn zo'n breed uitgesponnen procedure spontaan en zonder inspanning te leren gebruiken.

Het antwoord van Chomsky op dit probleem was het voorstel tot nieuwe soorten beperkingen op de keuze van regels, soorten die gruwelen als de oude passieve transformatie ontoegankelijk zouden maken en andere, meer eenvoudige, toegankelijk. Hij stelde dat transformatie slechts één zinsdeel per keer kan verplaatsen. Dit betekende dat bij de vorming van de passieve vorm het kind twee eenvoudige regels leert, in plaats van een enkele ingewikkelde. De eerste regel zegt: 'Verplaats "jager" naar de lijdend-voorwerpcontext.' De tweede regel zou dan zeggen: 'Verplaats "vos" naar de onderwerpcontext.' Later verving Chomsky deze twee regels door een soort transformatie, zo eenvoudig en algemeen, dat ze niet meer hoeft te zeggen dan: 'Verplaats "jager".' De universele grammatica verschaft kennis over de context en de

specifieke condities, waardoor de rest van de zin snel en gemakkelijk op de juiste plek terechtkomt.

Dit betekent dat de aangeboren beperkingen van de universele grammatica in Chomsky's theorie steeds meer centraal komen te staan. Taal wordt makkelijk en natuurlijk geleerd, omdat de leerling opmerkelijk weinig keuzevrijheid wordt gegeven. De vergrote rol, toegekend aan de universele grammatica, houdt in dat taal nog minder afhankelijk is van het bewuste intellect dan zou worden verondersteld. Ray Jackendoff, taalkundige aan Brandeis University met chomskyaanse overtuiging, zegt dat we, louter door ontdekking van wat de universele principes die de keuze beperken en de mogelijkheden reduceren, hopen te kunnen verklaren waarom de taal natuurlijk is, in plaats van uitgevonden:

Men is gaan inzien dat men niet te hooi en te gras transformaties kon gaan uitvinden, want hoe zou een kind kunnen leren die uit te voeren? Het werd duidelijk dat er een theorie moest worden gevonden die het kind een heleboel minder ruimte gaf om te schipperen en die zo zijn keuzevrijheid beperkte. De fouten die kinderen maken zijn gewoonlijk niet zo dramatisch en door de bank genomen doen ze de juiste keuzen. Als een bizarre en idiote regel als de oude passieve transformatie werkelijk bestond, dan betekende dat dat er andere woeste en idiote transformaties bestonden en andere regels die daarmee binnenslopen. Dit schond de voorwaarde die Chomsky vanaf 1965 begon te beklemtonen, namelijk dat taal vooral *leerbaar* moet zijn en dat een taalkundetheorie die leerbaarheid moet verklaren.

Jackendoff gelooft dat het uiteindelijke doel van de taalkunde is het vinden van een complete verzameling voorwaarden voor regels, om ze van idioterie te weerhouden en ze leerbaar te maken. Als analogie gebruikt hij graag de theorie van de beweging van de hemellichamen. De grammatica is te zien als Keplers wetten voor de beweging van de planeten, die met een prachtige precisie beschrijven wat er gebeurt en welke beperkingen gesteld zijn aan de baan van de planeet, beperkingen die ze binnen bepaalde grenzen houden. Maar de wetten van Kepler vertellen ons niet waarom die banen op deze manier beperkt worden, evenmin als een grammatica ons vertelt waarom zinsstructuren juist op die specifieke manieren beperkt zijn. Om beperkende voorwaarden van de planetaire banen te verklaren, hebben we een algemenere theorie nodig: de theorie van de zwaartekracht. Om de beperkende voorwaarden gesteld aan taal te verklaren hebben we een theorie nodig van wat er in de hersenen omgaat wanneer taalkundige informatie wordt verwerkt. Zo'n theorie zou zeer abstract kunnen zijn en zou ons, na ontdekking, op een heel nieuwe manier over grammatica kunnen doen denken, net zoals de ontdekking van de wetten van de zwaartekracht de mensen ertoe bracht zich een volledig nieuw beeld te vormen van de beweging van de planeten.

Einstein heeft eens als een axioma van de moderne quantumfysica gesteld dat 'het de theorie is die bepaalt wat we kunnen waarnemen'. Daarmee bedoelde

hij dat de geestelijke constructies, gebruikt om het gedrag van materie op het subatomaire niveau te verklaren, de vrijheid van de wetenschapsbeoefenaar beperken, waardoor hij louter en alleen bepaalde soorten informatie kan verkrijgen over materie. Chomsky zou het voorschrift van Einstein als volgt kunnen aanpassen: 'Het is de theorie, dat wil zeggen de universele grammatica, die bepaalt welk soort taalkundige kennis we kunnen verwerven.' Ervaring kan de taalregels niet verklaren. Inwendige principes van de geest, diepe en abstracte principes, zijn de enig mogelijke verklaring op de vraag waarom taal zo bijzonder is, zo universeel in bepaalde aspecten en uniek bij mensen.

De vraag die Chomsky zo bezighoudt en die hij zo vaak stelt is, of er andere, unieke 'mensen-grammatica's' in de hersenen bestaan, die andere zeer complexe soorten van kennis voortbrengen. Aangeboren beperkingen zouden veel andere mogelijke grammatica's uitsluiten en zo de keuzevrijheid beperken, zoals dat het geval is bij gesproken taal.

Het zou kunnen dat muziek een van deze andere vormen van kennis is. Deze vooronderstelling zou kunnen worden onderschreven door recent onderzoek naar de geestelijke strategieën van muzikale wonderkinderen, die muzikale competence bijna even gemakkelijk opdoen als een normaal kind taal-competence. Dit onderzoek, dat zelf nog in de kinderschoenen staat, stelt als mogelijkheid dat buitengewoon begaafde kinderen over een anti-toevalsinstrument beschikken, een 'metatheorie', die het voor hen gemakkelijk maakt de grammatica van de muzikale vorm op te pikken. Zo'n instrument is in de hersenen van wonderkinderen aangeboren en stelt hen in staat veel muzikale kennis op te doen uit weinig gegevens. Maar deze metatheorie is bij normale kinderen niet aangeboren, althans niet zo sterk.

Howard Gardner, psycholoog aan Harvard University en verbonden aan het Project Zero, een onderzoek om de groei van kunstzinnige vaardigheid in de jeugd beter te leren kennen, komt tot de conclusie dat muzikale wonderkinderen een speciale gave hebben om symbolen sneller te leren beheersen dan andere. Complexe, regelbestuurde structuren zijn voor hen toegankelijker. Zoals Gardner het stelt: 'De patronen springen eruit.' Hij vergelijkt deze ongewone predispositie van de geest met een erfelijke ziekte. 'Bepaalde mensen zijn door hun genetische erfenis ontvankelijk voor bepaalde ziektes,' zegt hij. 'Ze lopen het risico die ziekte te krijgen.' Kinderen bij wie de patronen eruit springen, zijn ontvankelijk voor muziek. Ze pikken het op, mits ze ermee in aanraking komen, zoals bij de meeste kinderen met taal gebeurt.

De dirigent en componist Leonard Bernstein heeft dit idee veel verder uitgewerkt in een serie lezingen aan Harvard University. Volgens hem kunnen abstracte, aangeboren beperkingen, werkzaam op het onbewuste niveau van de geest, bepaalde muzikale structuurregels uitsluiten en andere toelaten, zodat het menselijk brein geleid wordt tot de aanvaarding van een 'correcte' muziektheorie, zonder veel bewust denken. Zelfs een luisteraar zonder buitengewone gaven heeft verhoudingsgewijs weinig ervaring nodig om zo'n theorie op te doen, omdat niet-correcte theorieën veel minder toegankelijk worden gemaakt door de beperkingen die zijn gesteld aan zijn vrijheid. Feitelijk postuleert Bernstein het bestaan van een universele grammatica van de

muziek, die sommige soorten van de muzikale vorm natuurlijker voor het oor maken dan andere.

In de negentiende eeuw dacht men dat de muzikale intervallen van tertsen en sexten de aantrekkelijkste waren, omdat ze liggen binnen de grenzen van de verhoudingen waarop het oor vat kan krijgen. Men nam aan dat toehoorders ervan houden iets zinnigs te ontdekken aan klanken die net onregelmatig genoeg zijn om interessant te zijn, maar zich desalniettemin conformeren aan een fundamenteel systeem van beperkingen. Sindsdien hebben deze grenzen zich aanmerkelijk verwijd. Het publiek heeft echter laten merken dat het zich niet op zijn gemak voelt bij werken die al te drastisch met de oude structuurregels breken, in het bijzonder die welke volledig breken met de tonaliteit.

Tonaliteit is in wezen een verzameling regels voor het voortbrengen van reeksen muzikale noten, waarin een afzonderlijke noot dient als een stabiel punt waaraan de compositie refereert en waarnaar ze terugkeert. In tonale muziek worden alle noten verbonden dank zij deze verhouding tot die ene, primaire noot, die de 'tonica' wordt genoemd, of de 'grondtoon' van het stuk. In statistische zin is het de waarschijnlijkste noot, zoals de letter 'e' de waarschijnlijkste letter is in een Nederlandse tekst.

Tonale muziek is hecht georganiseerd, net zoals de grammatica van een taal. Ze heeft haar eigen regels om willekeur achter zich te laten en is erg rijk binnen die begrenzingen. De atonale, of seriële muziek van Arnold Schönberg overtreedt deze regels, hoe rijk ze ook is qua structuur. Haar notenreeksen zijn niet willekeurig, maar de waarschijnlijkheden volgens welke bepaalde noten op bepaalde plaatsen in de partituur zullen voorkomen, zijn niet dezelfde als die van tonale muziek. In sommige opzichten zijn de klassieke regels op hun kop gezet en dwingen ze dissonantie af waar onder het klassieke regelsysteem harmonie geboden zou zijn. Schönberg zelf achtte het van het grootste belang dat zijn werk begrijpelijk zou zijn, ongeveer zoals een taal wanneer zij kampt met verandering en ernaar streeft de begrijpelijkheid ervan te bewaren. Maar zijn muziek werd minder algemeen aanvaard door concertgangers dan die van zijn leerling, Alban Berg, die tonale elementen in de seriële muziek introduceerde.

Het is een interessante vraag of de omgekeerde regels van de atonale muziek aangeboren principes schenden die bepalen welke regelsystemen de geest van nature als vanzelfsprekend aanvaardt en welke niet. Het commentaar van Ray Jackendoff:

Tonaliteit is niet slechts de reactie van de mens op natuurkundige feiten over klank. Evenals taal, wijst de tonaliteit in de muziek eerder op een cognitieve organisatie met een geheel eigen logica. De geest volgt niet simpelweg het natuurkundige pad van de minste weerstand [...] maar schept zijn eigen manier om combinaties van toonhoogten in samenhangende patronen te organiseren.

Een ander, meer speculatief soort kennis, die zou kunnen zijn gebaseerd op aangeboren principes, in plaats van in haar geheel geleerd te worden uit erva-

ring van buitenaf, is het systeem van psychologische archetypen, voorgesteld door C. G. Jung. Sommige chomskyaanse taalkundigen geloven dat een studie van archetypen en hun structuur, evenals de taalstudie, zou kunnen leiden tot een beter begrip van de formele eigenschappen van de geest. Het bewijsmateriaal voor het bestaan van archetypen is niet doorslaggevend en er bestaat waarschijnlijk geen manier om ze als wetenschappelijke feiten te toetsen. Aan de andere kant gebruikte Jung ze wel degelijk als basis voor een indrukwekkende en samenhangende theorie van de psyche.

Naar zijn mening zijn archetypen in wezen beperkingen, geestelijke structuren in het onbewuste, waardoor boodschappen in de vorm van beelden verzonnen kunnen worden naar het bewustzijn. De aard van deze boodschappen is mythologisch en symbolisch. Jung spreekt van de archetypen op een manier die sterk lijkt op die van Chomsky als deze spreekt van de universele grammatica. Ze kennen aan de geest bijzondere soorten universele kennis toe, die ervoor zorgdraagt dat de thema's van de wereldmythen evenals bepaalde taalconstructies universeel zijn, en dus steeds weer opduiken na tijdvakken en in culturen overspannen die weinig of geen contact met elkaar hadden.

Zoals Jung ze beschrijft, verschaffen archetypen mogelijkheden, voorwaarden voor de werkelijke produktie van ideeën en fantasieën. Ze bestaan niet in de geest als het resultaat van oefening of onderricht, maar zijn een biologische eigenschap, gespecificeerd door het DNA. Een archetype kan niet rechtstreeks gekend worden, maar alleen door het verschijnen van het archetypische beeld dat spontaan opkomt. Omdat mythische informatie een universele basis heeft buiten de tijd, is ze niet afhankelijk van specifieke ervaringen en niet rechtstreeks verbonden met het intellect. Ze speelt een rol in kunstzinnige en literaire bezigheden. Het rationele intellect kan dan mythen en beelden als onzin afdoen en proberen ze te onderdrukken, altijd komen ze op de een of andere manier terug. De vorm is echter beperkt. Het staat haar niet vrij willekeurig te zijn. Mythen hebben, evenals dromen, hun eigen bijzondere logica en structuur. En deze structuur weerspiegelt de structuur van de geest.

Jung stelde ook voor dat de verzameling natuurlijke getallen een archetype van de orde is, vertegenwoordigd in de bewuste geest, dat hem helpt de 'chaos van de verschijnselen' in een soort regelmatig patroon te plaatsen. Als hij gelijk heeft, is het getalsysteem weer een voorbeeld van *a priori* kennis die een uitzonderlijke macht bezit de willekeur van de ervaring te regelen. Evenals taal wordt ze gemakkelijk verworven, omdat andere, verschillende typen getalsystemen minder toegankelijk zijn. Niet voor niets worden ze 'natuurlijke' getallen genoemd.

Er zit een paradox in Chomsky's visie op taal. Aan de ene kant wordt een grammatica van het type dat hij beschrijft zeer beperkt door universele, noodzakelijke principes. Een oneindig aantal woordreeksen wordt door middel van dergelijke ingebouwde beperkingen uitgesloten. Aan de andere kant ligt

Chomsky's betekenis als taalkundige in het feit dat hij de onbeperkte overvloed van taal beschouwt als haar belangrijkste eigenschap, een eigenschap die elke taaltheorie moet verklaren, op straffe van afgeschreven te worden. Deze paradox wordt in zijn theorie opgeheven, omdat, hoewel ze vele mogelijke grammatica's verbiedt, de werkelijk gekozen grammatica een onbeperkte overvloed aan welgevormde zinnen kan voortbrengen.

Chomsky gelooft dat de intrinsieke, formele taalinstrumenten onafhankelijk van hun werkelijke gebruik moeten worden bestudeerd, omdat zo'n benadering eenvoudiger en onthullender is en het makkelijker wordt voorspellingen over de taalstructuur te toetsen. Hij beschouwt creativiteit in taal als gebaseerd op 'een systeem van regels en vormen'. Ontegengesteld ruimt Chomsky een plaats in voor regels die betekenis toekennen aan een zin volgens de manier waarop die wordt gebruikt in een specifieke context in de 'reële wereld'. Maar voor hem houdt de syntaxis, als zuiver kader en patroon, geen verband met betekenis, klank of context. Ze is min of meer geestloos. Syntaxis genereert grammaticale reeksen woorden, of deze nu passend zijn of niet; in een later stadium van verwerking verwerpen de interpretatieregels zinnen zonder betekenis. Zo gedefinieerd is de syntaxis gescheiden van gebruik en ervaring. De universele grammatica, de koning van de chomskyaanse linguïstiek, lijkt, zoals we hebben opgemerkt, op moderne wetenschappelijke theorieën, met als wezenlijk vermogen de geest voorbij de ervaring te brengen, waardoor nieuwe informatie niet opkomt vanuit de wereld, maar vanuit abstracties in de geest.

Door zoveel nadruk te leggen op aangeboren, *a priori* regelende principes, bestaat echter het gevaar dat andere belangrijke structurele taalaspecten blijven liggen. Chomsky's critici, en dat zijn er vele, betwijfelen of het snoeien van de ervaring tot zo'n miniem belang wel recht doet aan de ware taalrijkdom, aan haar 'regels en vormen' in veel bredere zin. Ze vragen zich af of hij de complexiteit van taal niet onderschat, en daarmee de complexiteit van de geest. Men zou kunnen denken dat de wezenlijke taalstructuur geheel inherent is aan, en gegeven wordt door de syntaxis en niet gerelateerd is aan de functie van taal als een communicatiehandeling met medemensen. In Chomsky's visie hoeft taal geen communicatie in deze betekenis te zijn. Ze mag dan in de evolutie voor dat doel zijn opgekomen, maar nu zijn de taalprincipes veranderd in de hersenen, ongeacht of ze voor communicatie wordt gebruikt of niet. Ze kunnen een zuiver persoonlijke rol spelen, als stemloos middel om iemands gedachten te verhelderen of om gedichten te schrijven die niemand anders zal lezen.

Uit recent onderzoek naar taal als een samenhangend vertoog, en niet als tekst of afzonderlijke zinnen, blijkt echter dat veel van haar onderliggende patronen worden gedictieerd door de sociale doelstellingen waarvoor de woorden bestemd zijn. En deze patronen zijn, net als de syntaxis, wezenlijk voor de taal, ook al zijn ze niet syntactisch in de strikte betekenis van het woord. Taalkundigen ontdekken bijvoorbeeld dat telefoongesprekken, die aan de oppervlakte vormloos en voor de vuist weg lijken, in werkelijkheid systematisch zijn, vol verborgen structuur en onverwachte regelmatigheden. De

conversationale structuurregels verschillen heel sterk van de dialoogregels in televisieseries, die ook onderworpen zijn aan taalkundige analyse. Maar beide soorten vormen een aspect van de complexiteit van taal, van haar niet-willekeurig zijn.

De stukken van Harold Pinter vormen nog een ander voorbeeld, behalve dan dat taal zo wordt gebruikt dat bijna alle betekenis buiten de zinnen zelf ligt. Ze moeten worden geïnterpreteerd met een bijzondere verzameling regels, omdat bij Pinter woorden niet geuit worden om te refereren naar ideeën of zaken, maar om mensen te dwingen te bepalen hoe de positie van iemand ten opzichte van een ander in een verhouding is. De 'betekenis' van de woorden is hun effect op andere betrokkenen in de conversatie, hoe ze de manier veranderen waarop elke persoon de ander beschouwt. De letterlijke woordbetekenis is van weinig belang, omdat de structuur van de zinnen de structuur van een verhouding weerspiegelt, in plaats van de formele regels van de syntaxis.

Zoals we ons herinneren brengt Chomsky een belangrijk onderscheid aan tussen de competence, die regelmatig en ordelijk is, en de performance, zoals de conversatie, die hij ziet als entropisch, 'ruisend', vol fouten. Om deze reden wordt verondersteld dat ze minder nuttige informatie bevat. Toch kan de performance niet zo willekeurig zijn als ze lijkt. Een kenmerk van de performance die Chomsky naast zich neerlegt als niet relevant voor een linguïstische theorie, is het gebruik van tussenvoegsels als 'uh', 'eh' en 'uhm', die in conversaties zo veelvuldig voorkomen. Op het eerste gezicht lijkt de verdeling van deze tussenvoegsels wanordelijk en niets te maken hebbend met de structuur of de inhoud van de zin waarin ze voorkomen. Maar bij een nauwkeurig inspectie blijken ze van beide een wezenlijk onderdeel te vormen. Ze zijn boodschappen, geen ruis. Robin Lakoff, van de Taalkundefaculteit aan Berkeley, is over dit onderwerp bijzonder duidelijk. Hij biedt prestigieuze dissidenten en ontsnappers uit Chomsky's kamp een dak dat wel een werelddeel van het MIT verwijderd lijkt te zijn. Dr. Lakoff gaf me de volgende zinnen als voorbeeld:

I understand that, uh, Kissinger is a vegetarian.
(Ik begrijp dat, eh, Kissinger vegetariër is.)

I understand that Kissinger is, uh, a vegetarian.
(Ik begrijp dat Kissinger, eh, vegetariër is.)

In de eerste zin drukt het 'uh' vóór Kissinger twijfel uit over de verklaring als geheel en impliceert het dat de spreker er geen volledige verantwoordelijkheid voor neemt. In de tweede zin betekent het 'uh' dat de spreker er zeker van is dat Kissinger *iets* is, maar niet zeker weet of hij vegetariër is.

Zulke tussenvoegsels zijn een conversationeel instrument en hun gebruiksregels staan op één lijn met syntactische regels. In de syntaxis verandert hetzelfde woord de zinsbetekenis bij verplaatsing naar een andere plek in de zin. De uitspraak 'Jan raakte de bal' is niet dezelfde als 'De bal raakte Jan'. In de Kissinger-zinnen heeft de positieverwisseling van 'eh' een vergelijkbaar gevolg voor de betekenis. Zoals andere conversationele instrumenten verandert het de boodschap van een zin in plaats van eenvoudig haar entropie te vergroten door toevoeging van ruis.

Het is duidelijk dat de syntaxis lang niet het enige regulerende taalprincipe is. De performance heeft haar eigen regels, waarvan er enige universeel zouden kunnen zijn. De woordvolgorde in een geuite zin wordt slechts gedeeltelijk bepaald door formele mechanismen die worden beheerst door de universele grammatica. Ze wordt ook beïnvloed door meer concrete en specifieke factoren, die te maken hebben met de geestesgesteldheid van de spreker, zijn bedoelingen, de context binnen welke hij spreekt, de indruk die hij op anderen wil maken.

Taal is dus veel rijker aan structuren van verschillende soorten, veel genuanceerder geregeld dan taalkundigen ooit veronderstelden. Het was Chomsky's verdienste dat hij liet zien dat zelfs de formele, syntactische structuur niet is wat ze aan de oppervlakte lijkt, maar dat ze wordt afgeleid van andere, verborgen structuren op een verschillend niveau van informatieverwerking in de hersenen. Op dit niveau, verder verwijderd van de werkelijke spraakklanken worden boodschappen in een expliciete vorm gecodeerd. De ontvanger van de boodschap moet dat proces omkeren, door de transformatieregels te gebruiken, om van de vaak misleidende oppervlakte af te dalen tot de meer abstracte, maar minder verwarrende boodschappen daaronder.

Dit geldt echter ook voor regulerende principes die aan de performance ten grondslag liggen, principes die geen syntaxis zijn in de zin van Chomsky en toch deel uitmaken van de taalstructuur. De intenties van de spreker kunnen onduidelijk zijn aan de oppervlakte, die vaak een verdraaide versie is van patronen van gedachten en emoties op een dieper niveau. Verkenning van deze diepere patronen houdt in net zoveel te leren over de aard van de geest als over de aard van de taal. Dit draagt de taalkunde ver voorbij de grenzen die Chomsky zichzelf stelde.

Als taal werkelijk een spiegel van de geest is, moet ze niet slechts de algoritmen van de syntaxis weerspiegelen, maar de geest in zijn geheel, de volledige verzameling regels via welke een menselijk wezen, in de woorden van Lakoff 'vorm en zin geeft aan zijn universum, die er zonder hen niet zouden zijn'. Zo raakt de taalkunde sterk verweven met de psychologie, want beide bestuderen de verhouding tussen willekeur en informatie. Beide wetenschapsgebieden zijn even complex, wat kan verklaren waarom geen van beide tot nog toe onder druk van vindingrijke, diepgaande onderzoeken haar complete schat aan geheimen heeft prijsgegeven - bij lange na nog niet.

DEEL IV

Hoe de hersenen alles samenvatten

16. DE HERSENEN ALS KAT OP EEN HEET ZINKEN DAK EN ANDERE VERMEENDE WAARHEDEN

Shannon was hogelijk geïnteresseerd in computers, niet louter als rekenmachines, maar als informatiesystemen die in toenemende mate de menselijke intelligentie zouden kunnen nabootsen. Hij was onder de indruk geraakt van de profetische kant van de satirische roman van Samuel Butler, *Erewhon*, gepubliceerd in 1871, waarin nogal eenvoudige machines worden afgeschilderd als zich ontwikkelend naar meer complexe, in een soort parodie op de darwistische natuurlijke selectie. In de vroege jaren vijftig waren computers verhoudingsgewijs dom en zo omslachtig dat men schatte dat er een kamer nodig zou zijn zo groot als het Empire State Building voor de bouw van een exemplaar met evenveel radiobuizen als het aantal zenuwcellen in de menselijke hersenen en dat de energiebron het formaat van de Niagara-watervallen zou moeten hebben. Maar zelfs toen voorzag Shannon de grote verbeteringen in ontwerp, waardoor computers logica zouden kunnen gebruiken, kunnen vertalen en spellen spelen.

Shannon geloofde echter, dit in tegenstelling tot veel tijdgenoten, dat de wetenschap meer kon leren over de menselijke hersenen door bestudering van de wijze waarop ze van de computer verschillen, dan door te zoeken naar de overeenkomsten tussen die twee, ook al leken deze toen zeer opvallend. Deze benadering stemt zeer wel overeen met de hedendaagse denkwijze. Naarmate wij meer weten van de hersenen, wordt hun bijzondere manier om kennis te genereren in veel belangrijke opzichten gezien als geheel verschillend van die van computers.

Computers zijn goed in snelle, nauwkeurige berekeningen en in het opslaan van grote hoeveelheden informatie. Hier staat tegenover dat de hersenen niet zo efficiënt zijn als getallenvreter en hun geheugen is vaak zeer feilbaar; een fundamentele onnauwkeurigheid is in hun ontwerp ingebouwd. Het sterke punt van de hersenen is hun soepelheid. Ze zijn onovertroffen in het maken van geslepen gissingen en in het begrijpen van de gehele betekenis van informatie die ze wordt aangeboden.

De bouwstenen van de hersenen zijn in bepaalde opzichten opmerkelijk goed te vergelijken met die van de computer, maar in andere opzichten in het geheel niet. De hersenen tellen zo'n 10 miljard tot wellicht 50 miljard van deze bouwstenen, 'zenuwcellen' of 'neuronen'. Een neuron stuurt een boodschap naar een andere neuron door middel van elektrochemische pulsen, waarvan er een paar tegelijk kunnen aankomen, of in salvo's van wel duizend per seconde. Of het tweede neuron wel of niet reageert op de boodschap is afhankelijk van de omstandigheid of de pulsen voldoende talrijk zijn om een

antwoord los te maken. Evenals de bits (de nullen en de enen van Shannons code), kan een neuron alleen in een van de twee mogelijke toestanden verkeren; het kan 'ja' antwoorden of 'nee', een signaal afvuren of hiervan afzien.

Geen twee neuronen zijn gelijk aan elkaar. Elk heeft zijn eigen bijzondere drempel, waaronder het niet zal vuren en waarboven het dat wel zal doen. Een neuron schakelt zichzelf alleen aan wanneer een prikkel sterk genoeg is om de drempel te doorbreken. Als de prikkel te zwak is, zal het neuron niets doen; in dat geval had de prikkel er even goed niet kunnen zijn. Om het nog ingewikkelder te maken, wisselen de door een zenuwcel in actie uitgezonden pulsen niet in sterkte met de kracht van de prikkel, zoals bij een vermogenproducerende machine. Wat er gebeurt is dat bij het sterker worden van de prikkel, de grootte van elke puls gelijk blijft, maar dat het aantal pulsen per seconde toeneemt.

Bijgevolg bestaat er een intrinsieke onzekerheid binnen dit systeem van boodschapoverbrenging. Wanneer bijvoorbeeld iets kouds de huid aanraakt, flitsen neuronen informatie over deze gebeurtenis naar de hersenen en deze antwoorden, maar het is onjuist te zeggen dat de prikkel rechtstreeks het antwoord produceert. De relatie is bij lange na niet zo eenvoudig en lineair; het is het neuron dat wordt geactiveerd en niet de prikkel.

Zenuwcellen geven de informatie niet alleen door, ze zetten die ook om van de ene vorm in een andere. Het ene neuron maakt contact met andere door middel van draadachtige weefsels in een complex communicatienetwerk, maar de verbindende schakels werken niet volgens het eenvoudige oorzaak-gevolgpatroon. De ene cel is niet simpel via een kabel met de andere verbonden, zoals twee mensen die over de telefoon met elkaar praten. In plaats daarvan moet het signaal een minuscule kloof oversteken, ongeveer een half miljoenste centimeter breed, de 'synaps'. Het gevolg van het bestaan van de synaps is de introductie van nog een onzeker element in een fundamenteel onzeker systeem.

Ondanks zijn minuscule formaat, is de synaps van groot belang. Er zijn waarschijnlijk meer dan één biljoen synapsen in de hersenen; elk ervan is een soort codeerstation, waar signalen binnenkomen in de vorm van salvo's elektrische pulsen, zoveel per seconde, die dan worden vertaald in chemische signalen in de vorm van heel kleine, afzonderlijke pakketten. Alleen wanneer een voldoende aantal pakketten zich ophoopt, wordt een kritische drempel bereikt en passeert informatie de synaptische kloof. De zenuwcel aan de andere kant van de kloof berekent de frequentie van de aankomende pakketten en vuurt een eigen signaal af als die frequentie hoog genoeg is. Dit is het middel van transmissie via de fundamentele communicatiekanalen van de hersenen. De code van de boodschap wordt van elektrisch naar chemisch vertaald en dan weer terug naar elektrisch bij haar verplaatsing van de ene zenuwcel naar de andere. Een dergelijke procedure zet de deur voor het toeval wagenwijd open, en laat zien hoe misleidend het is de wezenlijke processen van de hersenen te vergelijken met die van een computer.

Zelfs wanneer een signaal over een synaps naar een andere zenuwcel wordt gezonden, is dat niet noodzakelijk een opdracht om te vuren. Het signaal kan het neuron remmen (inhiberen) en zijn kans om te vuren verlagen. Dit gebeurt in werkelijkheid erg vaak. Wanneer een neuron een inhiberend signaal ontvangt, is het niet zo maar in staat zichzelf weer 'aan' te schakelen wanneer een later signaal de synaps oversteekt om een nieuw salvo op te roepen.

De hersenen zijn, net als taal, zowel stabiel als onvoorspelbaar. Ze zijn zeer redundant en volgens Shannon moet dat ook om globale betrouwbaarheid te verkrijgen bij het gebruik van onbetrouwbare componenten. De rol die een neuron speelt in het verwerken van een bepaald type informatie kan worden gedupliceerd door misschien tienduizenden gelijksoortige cellen. Sommige verbindingen tussen neuronen zijn 'veel-op-een', als hadden meer verschillende woorden in een taal dezelfde betekenis, waardoor de betrouwbaarheid toeneemt. Andere verbindingen zijn echter 'een-op-veel', als had een woord verschillende betekenissen, wat leidt tot meerduidigheid.

Zoals we hebben gezien, hangt het al dan niet vuren van een neuron niet van een enkele betekenis af, maar van het totale effect van veel gebeurtenissen, waarvan sommige onzekerder zijn dan andere. Pakketten chemicaliën kunnen zelfs spontaan de synaps oversteken, niet als signalen, maar als toevalstreffers, als interferentie in een radio-ontvanger, als onderdeel van de betekenisloze en niet te voorspellen achtergrondruis van de hersenen. In *The Conscious Brain* beschrijft de Engelse biochemicus Steven Rose drie soorten gebeurtenissen die de afgifte van chemische pakketten over de synaps naar een ontvangend neuron kunnen bewerkstelligen. Slechts één van deze drie gebeurtenissen is zeker en voorspelbaar: een boodschap die binnenkomt van elders in het centrale zenuwstelsel of van de buitenwereld. Een tweede soort gebeurtenis, het spontane vuren van een neuron door zijn eigen interne veranderingen, kan het gevolg zijn van een voorspelbare oorzaak, maar aan de andere kant kan ze ook willekeurig zijn. Het derde soort, de afgifte zonder specifieke reden, is helemaal willekeurig. Op deze manier is het mechanisme voor het doorgeven van informatie langs deze myriaden codeerstations van de hersenen een mengsel van het voorspelbare en het onvoorspelbare, een eigenschap gedeeld door veel in de natuur voorkomende informatiesystemen. Een tekort aan zekerheid is geprogrammeerd in de hersenen. Rose schrijft:

Op de synapsen tussen de cellen ligt het keuzepunt dat het zenuwstelsel van iets zekers, voorspelbaars en saais omzet in iets onzekers, iets waarschijnlijk en dus iets interessants. [...] Als we zeggen dat de evolutie van de mensheid die van de synaps volgde, zeggen we niet te veel.

De pioniers van de communicatietheorie, de cybernetica en de intelligente machines gingen inzien dat ze te maken hadden met een nieuwe verzameling denkbeelden en een nieuw vocabulaire, anders dan alle andere die de wetenschap voordien kende. In het bijzonder von Neumann beklemtoonde dat woor-

den als kracht, energie, arbeid en vermogen in belang werden voorbijgestreefd door andere woorden als codes, signalen, boodschappen, informatie. Deze accentwijziging is vooral van kracht in de hedendaagse benadering van de hersenen.

Freuds geschriften over de hersenen spreken nog steeds de oude taal van energie en vermogen. Zijn benadering doet denken aan de eerste dagen van de thermodynamica, toen nieuwe natuurwetten ontsproten aan de studie van stoommachines en het voornaamste doel van dergelijk onderzoek was het verkrijgen van meer arbeid voor minder brandstof. De freudiaanse woordenlijst, vol termen als drijfveren, repressies, ontladingen, bronnen en afvoeren, hoort bij die negentiende-eeuwse wereld van stoommachines en spoorwegen-mystiek. De hersenen werden gezien als een machine, wachtend op het verhit-ten van haar reservoirs.

Norbert Wiener maakte echter in een vroeg stadium duidelijk, dat er een kritiek onderscheid is tussen mechanische techniek en communicatietechniek en dat we dit onderscheid goed voor ogen moeten houden, willen we ook maar enigszins begrijpen hoe het zenuwstelsel werkt. Wiener zei dat een televisie-zender weliswaar een groot vermogen moet hebben om datgene te doen wat ze moet doen, maar dat de zender vooreerst en vooral een instrument is om boodschappen te verzenden. Aan de andere kant kan de boor van de tandarts slechts een klein gedeelte gebruiken van het vermogen dat nodig is om de zen-der aan te drijven; toch is de verbruikte energie de primaire overweging bij het ontwerpen van de boor. Wiener, geenszins bescheiden als het om eigen presta-ties ging, claimde in zijn memoires de verdienste de eerste te zijn geweest die de wetenschappelijke wereld had geattendeerd op het belang van dit onder-scheid en te hebben aangetoond dat beheersingsinstrumenten, zoals die wer-den gebruikt voor het richten van afweergeschut tegen Duitse vliegtuigen, evenzeer deel uitmaakten van de communicatiewetenschap als de telefoon of de radio, zelfs al zou hun functie kunnen liggen in het verplaatsen van een zo zwaar object als een groot kanon.

In tegenstelling tot de hypothesen van Freud, is het ontwerp van de hersenen dat van een communicatie-instrument. Net als de televisiezender is het een uit-gehongerde vermogenverbruiker. De hersenen vormen maar 2% van de totale massa van het menselijk lichaam, maar ze verbruiken zo'n 20% van de ener-gie van het lichaam. Toch is het zinloos hersenonderzoek te benaderen in ter-men van hun algemene metabolische bezigheden. Het is een systeem voor het coderen en organiseren van informatie en kan het beste worden opgevat bin-nen dat kader van ideeën.

Twee Amerikaanse psychiaters, Robert McCarley en Allan Hobson, lever-den uitgewerkt bewijsmateriaal voor de veronderstelling dat Freuds wezen-lijke visie van de psyche gebaseerd was op een geheel verkeerd idee omtrent de biologische, chemische en natuurkundige werkelijkheid van de hersenen. Het is alsof een wetenschapsman zou proberen de werkingsprincipes van een radiotoestel te verklaren vanuit theorieën over dieselmotoren. Freud ontwierp een model van het centrale zenuwstelsel in zijn *Project for a Scintific*

Psychology, geschreven in 1895, maar pas gepubliceerd in 1954. Veel van zijn latere theorieën van de psyche leidde hij daaruit af: veel van zijn werk steunt impliciet op het geloof dat de hersenen uiteindelijk te verklaren zijn in termen van hun fysieke structuur, hoewel Freud zich terdege realiseerde dat de wetenschappelijke kennis van de hersenstructuur in die tijd in een erg primitief stadium verkeerde. McCarley en Hobson concludeerden dat Freuds ideeën over de functie van de zenuwcellen in de hersenen 'eenvoudig en fundamenteel onjuist' waren.

Freud had gelijk in zijn beschouwing van de cellen als afzonderlijke eenheden, verbonden op bepaalde niet erg rechtstreekse manieren, maar hij kwam op een dwaalspoor toen hij aannam dat ze slaafse ontvangers waren van energie buiten de hersenen zelf en dat ze de energie in grote of kleine hoeveelheden aan andere cellen doorgaven. Dientengevolge dacht Freud dat de energie van de zenuwen, geheel extern gegenereerd, circuleerde in het centrale zenuwstelsel tot ze kon worden ontladen door lichamelijke activiteiten. Impulsen en wensen, niet door activiteiten vrijgegeven, waren onderdrukt en kwamen vaak in dromen aan de oppervlakte van het bewustzijn. Een hoog zenuwenergiepeil, samengeperst als de stoom in een locomotief, was onaangenaam voor de bewuste hersenen die sterk neigden tot het aangename ontladingsproces, tot wat Freud noemde het 'nirwanaprincipe'. Omdat ze zelf niet over onafhankelijke energie beschikken, waren de hersenen overgeleverd aan de zintuiglijke indrukken van de omgeving of aan impulsen vanuit instinctieve drijfveren als honger of agressie, die des te machtiger waren door hun onvermijdelijkheid, zoals dat met zintuiglijke indrukken het geval is. We kunnen ze niet buitensluiten door de ogen dicht te doen of weg te lopen, zoals we bij een overweldigende ervaring in de echte wereld zouden kunnen doen. Een energie-ontlading vanuit instinctieve drijfveren zou de geheugencellen zo krachtig kunnen beïnvloeden dat er hallucinaties geproduceerd zouden worden, tenzij het ego een gedeelte ervan zou kunnen afblazen. McCarley en Hobson noemen dit schema van Freud het 'kat op een heet zinken dak'-model, omdat het de bewuste hersenen schetst als koortsachtig dansend onder invloed van energievlagen van onderop, in de kamer van de instincten:

Freud hield hardnekkig vast aan het idee van neuronen als bronnen en afvoeren van energie die uiteindelijk van buiten de hersenen stamt; bij geen enkele gelegenheid vooronderstelde hij dat de neuronen hun eigen metabolische energie hadden of zelf-regelende netwerken vormden. Dit idee was van cruciaal belang voor Freuds neurologische model en bracht hem ertoe de oorzaak van het dromen buiten de hersenen te plaatsen, aangezien de uiteindelijke energiebronnen noodzakelijkerwijs ook extracerebraal waren. Dromen ontsproten uit somatische of externe prikkels. Deze these verplichtte Freud voorts tot het geloof in reactieve, in wezen passieve hersenen en dit leidde dus tot een model van de psyche dat deze karakteristieken deelde.

Een deterministisch beeld van de hersenen, waarin elke oorzaak rechtstreeks leidt tot een specifiek resultaat en instincten zichzelf bevestigen als heerszuchtige, ontlading eisende krachten, staat haaks op wat we vandaag weten.

Een bijzonder belangrijk verschil tussen energie en informatie is dat de eerste onderworpen is aan de wetten van de instandhouding en de tweede niet: informatie kun je scheppen of vernietigen. Door zenuwcellen op te vatten als energiebronnen en -afvoeren moest Freud de mogelijkheid uitsluiten dat gebeurtenissen in het zenuwstelsel eenvoudig geneutraliseerd of afgelast konden worden. Zo gedragen boodschappen zich in het geheel niet. Ze kunnen worden gestopt, uitgeschakeld, zonder de betaling van een prijs in de vorm van opgekropte, ziekelijk in de psyche rondwarende krachten. Verre van slechts te reageren op energievlagen die ze bombarderen vanuit instincten of vanuit de buitenwereld, bewaren de hersenen hun eigen informatiesysteem in een min of meer evenwichtige balans en besturen ze zichzelf tot op grote hoogte.

Op de meeste momenten worden op elk willekeurig moment meer neuronen in de hersenen uitgeschakeld dan aangezet en daarom is er geen behoefte aan veiligheidskleppen om overtollige 'stoompluimen' te doen afblazen. De hersenen aanvaarden niet passief wat ze wordt gegeven. Ze kiezen en vormen de boodschappen die ze nodig hebben en sluiten de niet-gewenste schakelingen af. Mogelijk dient wel 80% van de neuronen in de hersenen voor onderdrukking in plaats van stimulering van activiteiten. Selectiviteit is de toetssteen van de hersenen; ze weert bepaalde soorten informatie wanneer deze niet nodig is en aanvaardt andere soorten die betekenis hebben, of nieuws waarde of bruikbaar zijn op een gegeven moment en onder bepaalde omstandigheden.

Selectieve mechanismen versterken sommige boodschappen, terwijl ze 'de knop lager zetten' voor andere, de onbelangrijke, de al te bekende, de herhaalde. Het omdoen van een polshorloge 's morgens maakt een duidelijke indruk op de zintuigen, maar die indruk vervaagt vlug, zodat het horloge niet meer wordt opgemerkt, tenzij we ernaar kijken. Geluiden zonder betekenis wijken terug naar de achtergrond, waardoor het mogelijk is volmaakt geconcentreerd een boek te lezen in een volle bus, tenzij er een vreemd en ongewoon hard geluid klinkt, waaraan de hersenen dan aandacht zullen besteden. In de Tweede Wereldoorlog konden zeelui tijdens de nachtwacht zitten knikkebollen terwijl zij luisterden naar de gewone verkeerssignalen die in hun koptelefoons in morse binnenkwamen, maar zo gauw het normale signalenpatroon veranderde, waren ze weer alert. Men denkt dat modellen van vertrouwde of onbelangrijke boodschappen ergens in de hersenen zijn opgeslagen, op een onbewust niveau, en dat wanneer de boodschappen veranderen of nieuwe, betekenisvolle boodschappen binnenkomen, het contrast tussen de binnenkomende informatie en de modellen de aandacht op die informatie vestigt.

Bij een breed scala van activiteiten kiezen de hersenen de benodigde informatie. Bij visuele waarneming richt het zenuwstelsel zich op bepaalde aspecten van een tafereel, in plaats van op andere, waardoor elke observatiedaad uniek is voor de persoon en het ogenblik. Zien is niet zozeer het beschouwen van de wereld door een camera, dat slechts de registratie van een bepaald beeld is, maar zien is een rusteloos zoeken en aftasten. Horen is een ingewikkeld proces van het beluisteren van klanken die we moeten ontwarren uit te neren geluiden. Het geheugen is geen bandopnameapparaat, dat informatie

opslaat met het indrukken van een knop. Het is ook selectief. Het geheugen is voor een deel een manier om informatie zo te herordenen dat het bijzonder wordt voor de persoon die het zich kan herinneren; dit proces is zo verscheiden en eigenaardig als wil het de formele modellen die psychologen steeds proberen te maken, door elkaar gooien.

De opkomst van de theorie van de selectieve hersenen houdt moeilijkheden in voor elke hypothese die gebaseerd is op het denkbeeld van de geest als hulpeloos slachtoffer. Deze theorie is helemaal niet verenigbaar met de principes van het behaviourisme, die stellen dat geestelijke processen uniform en voorspelbaar zijn en gemakkelijk van buitenaf te beheersen. Het behaviourisme is van mening dat de geest het best extern is te motiveren, ongeveer zoals sommige denkers vóór Newton zich voorstelden dat stoffelijke voorwerpen in de ruimte alleen bewegen wanneer ze worden geduwd en stilstaan wanneer dat niet meer gebeurt. Er is een schat aan bewijsmateriaal beschikbaar die aan toont dat dit niet het geval is. Een van de bekendste voorbeelden is het onvermogen van de politieke propaganda om grote aantallen toehoorders te dwingen tot of te winnen voor een bepaald gezichtspunt, zelfs gesteund met middelen uit de moderne media. De socioloog Wilbur Schramm heeft de consternatie beschreven die ontstond toen in de jaren vijftig de kogeltheorie van de communicatie ineen stortte. De kogeltheorie ging ervan uit dat het publiek passief was, klaar om via de media een propagandaboodschap op af te laten schieten, en dat men, als het raak was, met de pootjes omhoog in een toestand van dociele overgave zou komen, mits de kogel machtig genoeg was. Onderzoekers namen dan ook niet de moeite het publiek te bestuderen. In plaats daarvan analyseerden ze de inhoud van de boodschappen, in de vooronderstelling dat deze inhoud het geheim was van een geslaagde propagandakogel. Maar er stond de onderzoekers een verrassing te wachten: het publiek weigerde koppig in de ban van de boodschappen te raken. Soms reageerde het op manieren die tegengesteld waren aan de bedoelingen van de propagandist, of onderging het bombardement vreugdevol, zonder ook maar in het minst zijn mening te veranderen. Uiteindelijk moesten de onderzoekers hun hele benadering veranderen en

konden zij op indrukwekkende wijze aantonen dat het publiek verre van passief was; dat het van de massamedia echt datgene probeerde los te krijgen wat het wilde, dat het het daar gevondene naar eigen behoefte en opvatting interpreteerde en zelden als gevolg van massale overreding veranderde. Deze ontwikkeling, waarin de kogeltheorie veranderde van onderzoek naar een Koppig Publiek tot het concept van een Actief Publiek, is een van de interessantste en belangrijkste hoofdstukken in de moderne sociale wetenschappen.

In het onderzoek naar kunstmatige intelligentie trekken wetenschapsmensen lessen uit het feit dat de hersenen informatie verwerken op manieren die typisch, zelfs hinderlijk menselijk zijn, in plaats van mechanisch, zoals de oude opvatting luidde. Ze deden bijvoorbeeld de paradoxale ontdekking dat het vergeten een heel belangrijke functie vervult en het een bijproduct is van

leren. Computers worden nu geprogrammeerd om selectief te vergeten net zoals de hersenen, in plaats van elk brokje informatie in hun geheugen op te slaan. Verbonden met de telexapparatuur van nieuwsbureaus, volgen deze computers gedetailleerde berichten over mondiale gebeurtenissen. Maar in plaats van alle feiten van elk bericht te onthouden, pikken ze er alleen treffende informatie uit van een bepaald type en gooien de rest weg. Aldus kunnen ze generalisaties maken over oude berichten en conclusies trekken uit nieuwe op basis van deze generalisaties. Bij het lezen van een nieuwsbericht over een terroristenaanval in Italië zou de computer alleen al uit de plaats van aanval kunnen concluderen dat het slachtoffer een zakenman was of als het terroristische incident plaatsvond in Noord-Ierland, dat het slachtoffer een Britse politieman was, of een soldaat. Informatie die niet relevant is voor de generaliseringstaak wordt zonder meer vergeten.

Er zijn andere programma's geschreven die het vermogen van de hersenen nabootsen om bepaalde soorten informatie niet op te nemen als deze verhoudingsgewijs van minder belang is. Dit wordt gedaan met 'programmerings-spookjes'; zij 'slapen' in de computer, tot ze worden gewekt door een bijzondere boodschap, in welk geval het spookje de computer aanspoort zijn normale procedure te veranderen. Zo kan het apparaat onverwachte gebeurtenissen, die normaliter in een bepaalde context niet voorkomen, herkennen en dienovereenkomstig handelen. Als een programma een man beschrijft, lopend van zijn huis naar een groentewinkel, zou een spookje wakker schieten wanneer de man de weg oversteeft en er plotseling een vrachtauto op hem afrijdt; het spookje zou de man terug laten springen op het trottoir en zou hem op dat ogenblik het plan, de winkel bezoeken, doen laten varen. Wanneer dit verhaal hem zou worden voorgelegd, zou de computer 'begrijpen' waarom de man achteruitsprong.

In een gelijksoortig programma moet een denkbeeldig derde-wereldland een plan maken om ontwikkelingsfondsen aan te trekken. De regering van dit land gaat dan mogelijke hulpbronnen na, zoals de Verenigde Naties of de Wereldbank. Maar als het plan oorlogsdreiging inhoudt van de kant van een van de supermachten, zonder dat er hoop op hulp is, dan treedt een programmeringsspookje naar voren en waarschuwt dat zo'n oorlog zeker de nederlaag van het kleine land tot gevolg zou hebben. En als gedurende de onderhandelingen een land zich beledigd gaat voelen, komt het spookje van vriendelijke relaties uit zijn elektronische sluimer om verhitte gevoelens af te koelen.

Het doel van zo'n programma is de computer iets te geven van de soepelheid van de hersenen. Dit kan onvolmaaktheid inhouden als computers beschouwd worden als apparaten die informatie nooit zouden mogen vergeten of terzijde schuiven. Om computers nog minder computerachtig te maken, kijken onderzoekers nu naar een manier om ze minder enthousiaste minnaars van het letterlijke te maken. Dit probleem kwam in de belangstelling te staan door een toestel op Yale University, dat was ingericht om de nieuwsdienst in de gaten te houden, alleen berichten over aardbevingen te selecteren en die berichten in te dikken tot wezenlijke details. Ooit verbijsterde het toestel de

operators door eenvoudigweg te melden: 'Er was vandaag in Amerika een aardbeving,' met weglating van de vermelding waar de aardbeving had plaatsgevonden en hoe hevig ze was geweest. Het antwoord op het mysterie was dat de computer het metaforisch gebruik van een werkwoord niet had herkend in een verhaal dat begon met de woorden 'De dood van de paus schokte vandaag Amerika.'

Men houdt zich ook bezig met het probleem hoe computers subjectief te laten interpreteren. Mensen kunnen willekeurig materiaal ordenen in patronen, zelfs wanneer er objectief gezien geen patronen bestaan, bijvoorbeeld in Rorschach-tests. Deze vorming van taalpatronen wordt onbewust verricht door de psychische structuren in de hersenen. Anderzijds zien computers geen orde in ogenschijnlijk willekeurige verzamelingen stippen of vormen en verwerpen ze het merendeel van dergelijke onderdelen als zijnde volledige structuurloos.

Het staat vast dat we de hersenen beter kunnen begrijpen door de manier te bestuderen waarop ze afwijken van een computer, zoals Shannon stelde. Het is ook waar dat hoe vernuftiger programma's wetenschapsmensen proberen te ontwerpen teneinde aspecten van de typisch psychische strategieën van de hersenen in te bouwen in de software van hun apparatuur, des te opvallender en opmerkelijker de verschillen lijken.

17. DE BELEIDSLIJNEN VAN HET ZIEN

De hersenen zijn ver ontwikkeld, niet onbevangen, in hun omgang met de wereld. Ze maken zich een tot in details uitgewerkte, uitdrukkingskrachtige taal eigen, op basis van nogal rammelende gegevens. Ze herinneren zich ingewikkelde, geestelijke ervaringen beter dan de eenvoudige, en zelfs in een zo fundamentele routinebezigheid als de visuele waarneming kennen de hersenen vernuftige manieren om de informatie die het oog bereikt te bewerken, niet passief, door het aanvaarden van een afdruk, maar actief, volgens eigen regels. Daarom maken ze soms fouten. Het visuele systeem van de hersenen is, zoals het geheugen, ten dele onzeker, en wordt soms bedrogen omdat het zich moet behelpen met onvolledige kennis. Maar het is betrouwbaar op speciale, niet-eenvoudige manieren die tegemoet komen aan de unieke behoeften van het menselijke leven.

Fouten en hoe die te beheersen, dat waren hoofdthema's van de informatietheorie. Shannon ging ervan uit dat fouten ons altijd zullen omringen, omdat ruis in de communicatiesystemen even natuurlijk is als entropie in een thermodynamisch systeem. Het onvermengde zal altijd tot vermenging neigen. De oplossing van Shannon bestaat uit een code die willekeurige veranderingen in de boodschappen - veroorzaakt door ruis - corrigeerde. Zijn werk toont een algemeen geldend principe dat stelt dat betrouwbare informatie mogelijk is in een onbetrouwbare wereld, in tegenstelling tot wat we zouden verwachten.

De code werkt door toevoeging van redundantie. Dit houdt in dat een beetje gelijkheid wordt vermengd met verandering. Verandering is het wezen van informatie. Een boodschappenbron moet de vrijheid hebben haar boodschappen af te wisselen teneinde verschillende reeksen symbolen te verzenden. Het heeft geen zin dezelfde reeks steeds opnieuw uit te zenden. Maar redundantie garandeert dat bij alle boodschappen een patroon van waarschijnlijkheden constant blijft; daar kan de ontvanger op rekenen. Zo wordt een mate van consistentie ingevoerd in een systeem dat door zijn aard gedeeltelijk inconsistent moet zijn, om met het onverwachte te kunnen verrassen.

Hetzelfde algemene principe werkt wanneer we kijken naar de zich altijd wijzigende stroom indrukken van 'boodschappen' die het oog bereiken. Bijna altijd kunnen we er zin aan geven en ze als consistent ervaren. Veel psychologen geloven dat dat mogelijk is omdat de hersenen onbewust stabiele, betrouwbare elementen kiezen uit de lawine van zintuiglijke indrukken. Bij de waarneming is dit 'de crux van de hele zaak', zoals Shannon van zijn code zei.

Het beroemde advies van John Ruskin aan schilders om wat hij 'het onbevangen oog' noemde te ontwikkelen en de wereld zuiver en rechtstreeks te zien, precies zoals ze is, lijkt dubieus, zo niet onbetrouwbaar, als we rekening houden met wat we tegenwoordig van het zien weten. De Engelse kunsthistoricus sir Ernst Gombrich verklaarde in een commentaar over het naturalisme in de kunst dat het onbevangen oog niet bestaat. Het is een fictie. Het is niet

mogelijk een voorstelling te beschouwen als een beeld van licht en kleur op het netvlies ontdaan van betekenis en los van alle externe geestelijke activiteiten, omdat al het zien interpretatie is. Een kunstschilder moet een weide niet naïef zien als louter licht en schaduw, maar als een samenhang van kleurstoffen. Een verfstreek op een doek is nooit absoluut, goed of fout, uit eigen vrije verdiensten, maar staat altijd in een ingewikkelde verhouding tot alle andere verfstreken op hetzelfde doek. Op zich hoeft de kleur niet eens precies dezelfde te zijn als die van het stukje weide dat de verfstreek verbeeldt. Pas wanneer het schilderij af is en het hele systeem van kleurverhoudingen vastligt, zal ze op een passende manier met de werkelijkheid overeenstemmen.

Gombrich zegt dat de kunstenaar bij het schilderen al die betrekkingen tegelijkertijd in gedachten moet houden, zoals schakers een geestelijke greep houden op de verhouding tussen de verschillende stukken op het schaakbord en componisten op de verhouding tussen de noten en een partituur. Het werk van de 'onderzoekende geest die weet door te dringen in de dubbelzinnigheden van het zien' bestaat eruit de kunst te doen aansluiten op de werkelijkheid. Voor Gombrich is het naturalisme in de betekenis van een kunstvorm waarin elke penseelstreek uitsluitend wordt bepaald door wat zij aan de zintuigen geeft, een hersenschim. Zelfs als een kunstschilder erin zou slagen op het doek een voorstelling exact weer te geven zoals hij deze zag, zou niet iedereen het schilderij op die manier zien.

De waarneming is nog steeds een van de hete hangijzers in de psychologie. Hebben de hersenen een waarnemingstheorie, zoals zij een taaltheorie lijken te hebben? Ten aanzien van deze vraag neigen de onderzoekers te worden verdeeld in 'chomskyanen' en 'anti-chomskyanen', sommigen wat extreem, anderen dolend in het niemandsland tussen beide kampen, waar zij door beide zijden onder vuur worden genomen. Op de ene barricade staan degenen die geloven dat de hersenen hun eigen versie van de werkelijkheid construeren en daarbij heel weinig vertrouwen op de puur zintuiglijke informatie. Op de andere staan degenen die beweren dat de ervaring alle informatie verschaft die we nodig hebben en dat de hersenen uit die schat aan gegevens een keuze maken. De ideologische verschillen zijn vaak groot. Maar het is een bewijs van het universele karakter van informatieve concepten dat waarnemingspsychologen en taalkundigen gelijksoortige argumenten hanteren bij de verklaring van twee zeer ongelijksoortige functies van de hersenen: het zien en de taal.

Richard Gregory, de Engelse neuropsycholoog met wiens werk Chomsky het nadrukkelijk eens is, is een typische vertegenwoordiger van het ene uiterste. Gregory houdt staande dat de hersenen de wereld niet uitsluitend waarnemen op grond van de zintuiglijke gegevens op een bepaald moment, maar deze gegevens gebruiken om hypothesen op te stellen en te toetsen, zoals onderzoekers dat doen met de vaak geringe hoeveelheid beschikbare feiten.

Wanneer het oog kijkt naar een meerduidige figuur, zoals de beroemde kubus van Necker die zichzelf binnenstebuiten lijkt te keren en dan weer buitenstebinnen als we ernaar kijken, lijkt het alsof de hersenen eerst de ene en dan de andere hypothese toetsen in een poging een correcte theorie op te stellen op basis van onvoldoende bewijsmateriaal. Het gezichtsvermogen stelt nooit de correcte hypothese vast, maar blijft heen en weer gaan van de ene naar de andere. Gregory denkt zelfs dat het waarnemingssysteem van de hersenen dat zo actief de mogelijke antwoorden toetst op het raadsel dat ontstaat door wat het oog ziet, 'intellectueel eerlijker' is dan de rationeel geachte delen van de cerebrale cortex. Oog in oog met een meerduidig voorwerp of tekening, zal het waarnemingssysteem zich niet vasthechten aan een interpretatie en daarbij blijven, in tegenstelling tot de rationele geest, die vaak een bepaald dogma in politiek of religie zal aanvaarden en weigeren die op te geven, onverschillig hoe indrukwekkend de tegenbewijzen zijn.

Aan de andere kant van het ideologische spectrum staan de ideeën van de waarnemingspsycholoog James J. Gibson, wiens invloed de laatste jaren gestaag is toegenomen, zonder teken van verzwakking. Gibson, overleden in 1979, beweerde dat alle voor de waarneming benodigde informatie zich buiten de hersenen bevindt, in de wereld zelf. Zijn werk inspireerde onderzoek op terreinen die niet duidelijk verwant zijn aan dat van hemzelf, en zijn theorieën duiken op in boeken over kunst, esthetiek en taal, maar ook in technische artikelen over het mechanisme van het zien. Voor het ons geïnformeerd houden schrijft hij de omgeving een veel grotere rol toe dan de vertegenwoordigers van de school van Gregory.

Het is moeilijk een leerstelling te bedenken die meer afwijkt van het oosterse mystieke denken, dat de waarneembare wereld ziet als een illusie. 'Vraag je niet af wat er in je hoofd zit; vraag je af waarin je hoofd zit' is een typerende leus van de gibsoniaanse beweging in psychologie.

Zijn aanhang van bewonderaars en volgelingen groeide tijdens zijn laatste levensjaren en zijn ideeën werden overgenomen door hen die zich inspanden om samenhangende theorieën te ontdekken van moeilijk grijpbare geestelijke processen als het geheugen en de verbeelding.

Gibsons waarnemingstheorie is gebaseerd op de normale ervaring van gewone mensen in de alledaagse wereld. Ze is allesbehalve uitheems. Vroeg in zijn loopbaan verrichtte hij een bijzondere studie naar de manier waarop automobilisten snelheid en afstand beoordelen en in de Tweede Wereldoorlog deed hij onderzoek naar de waarnemingsproblemen van vliegers die hun toestel op het dek van vliegdekschepen neerzetten. Bij geen van deze activiteiten was filosofische speculatie over de aard van de werkelijkheid een erg grote hulp. Als een toestel over de rand van een vliegdek kiepert of een automobilist de achterkant van een vrachtauto raakt, heeft niemand iets aan filosofie. Gibson was ervan overtuigd dat de voor waarneming benodigde informatie in de buitenwereld en niet in het hoofd schuilt. Om de redenering wat minder oppervlakkig te houden: alle informatie zit in de structuur van het licht dat door voorwerpen en gebeurtenissen in de ruimte wordt gereflecteerd. Die

voorwerpen en gebeurtenissen geven aan het licht dat het oog bereikt zijn specifieke organisatie. Een waarnemer wordt in deze informatie ondergedompeld en ervan doordrenkt, en het waarnemingssysteem van zijn hersenen is erop afgestemd bepaalde aspecten van deze informatie op te vangen, hetzij door aangeboren circuits in het zenuwstelsel, hetzij door een door de ervaring gescherpt onderscheidingsvermogen.

Misschien zullen we de waarneembare wereld nooit helemaal kennen. Een inktvis kan horizontale en verticale lijnen zien, maar geen diagonale. De mens is zich ultraviolet licht niet bewust. Hoewel deze visuele informatie dus onvolledig is, betekent dat normaliter niet dat zij onjuist is. Visuele informatie is direct in vergelijking met geheugen, gevolgtrekking en verbeelding, welke de perceptie vergezellen maar daarvoor niet essentieel zijn. Zij hoeft niet door de hersenen te worden verrijkt, omdat ze al rijk genoeg is als ze het oog bereikt.

Gibson beweert dat de informatie in het licht de onderlinge verhouding van dingen specificeert. Ze houdt ons op de hoogte van wat wel en wat niet verandert in een voorstelling waarnaar we zitten te kijken en, als er sprake is van beweging, of wij bewegen of dat het de wereld is. Deze informatie is buitengewoon subtiel en omvat een onuitputtelijke voorraad gegevens die de waarnemer van zijn levensdagen niet allemaal kan opmerken, maar die in het algemeen niet misleidend is. De ervaring leert hem vele subtiliteiten te onderscheiden. Het is niet een kwestie van de hersenen die betekenis toekennen aan een wirwar van gewaarwordingen die als ordeloos gekleurde verfstreken op het netvlies liggen, maar van aandacht voor de onveranderlijke eigenschappen in de fijne structuur van het licht.

Licht verandert van het ene op het andere moment. Het verzwakt of wordt helderder en verandert in frequentie. Ook de waarnemer is nooit helemaal in rust. Hij beweegt om de dingen heen en bezielt ze onder verschillende hoeken. Auto's en mensen verdwijnen in de verte en werpen dan kleinere beelden op het netvlies van het oog. Vormen doemen op als we ernaar toe lopen. Vanuit het raam van een rijdende trein gezien lijken de dichtstbijzijnde voorwerpen sneller te bewegen dan die in de verte. Toch dwingt de waarnemer een zeker evenwicht af bij al dat krimpen en zwellen, bij al die groteske verwringing en verminking, door aandacht te schenken aan de stabiele elementen van verandering en door het overige te negeren. Het proces lijkt op het herkennen van een melodie, zelfs als deze naar een andere toonaard is getransponeerd. De verhoudingen tussen de noten zijn ongewijzigd, maar zij leggen niet langer beslag op dezelfde toetsen op het klavier. Dergelijke verhoudingen staan bekend als 'hogere-ordevariabelen' en worden opgemerkt omdat ze interessant en betekenisdragend zijn. Ze zijn dat wat de kijker of luisteraar wil en moet weten.

Volgens Gibson komen de structuurinvarianten van het licht dat ons oog bereikt overeen met de stabiele elementen van de werkelijke wereld: de oppervlakken en randen van voorwerpen waaraan de hersenen nauwlettend

aandacht schenken, en de compositie van de achtergrond die steeds dichter wordt naarmate de afstand toeneemt. Ondanks het feit dat het beeld op het netvlies in grootte afneemt als het voorwerp terugwijkt, blijft het beeld invariant ten opzichte van de compositie van de omgeving van het voorwerp. Een huis dat op een dambord van akkers staat lijkt kleiner als een kijker er vandaan loopt, maar hetzelfde gebeurt met de akkers rondom het huis. Het huis beslaat nog steeds hetzelfde aantal ruimtelijke eenheden, maar elke eenheid krimpt naarmate deze verderaf komt te liggen. Anders gezegd, de verhouding tussen het huis en zijn ruimte blijft gelijk.

We herkennen het gezicht van een bekende, ongeacht of we het zien als het glimlacht of bedroefd is, of in de volle zon of in maanlicht. We kunnen een glimp van zijn gelaat en profile vanuit een passerende bus opvangen of hem van dichtbij recht in het gezicht kijken. Er kan veel in zijn gezicht veranderen, maar iets wezenlijks blijft gelijk. Ondanks al deze veranderingen zijn de invarianten intact gebleven en deze merken we op. Vormen kunnen bedriegen als we ze vanuit vreemde perspectieven zien. Van bovenaf ziet een kopje er niet als zodanig uit en evenmin herkennen we meteen een dubbeltje dat op zijn kant ligt. Maar als het oog van de beschouwer het dubbeltje of het kopje vanuit verschillende hoeken verkent, kan hij hun invariante eigenschappen ontdekken en deze eruit lichten: het ronde, platte en harde van het dubbeltje en het holle en onvervormbare van het kopje.

Wiskundigen benaderen een dergelijk proces van invarianten, die bij transformaties behouden blijven, met de groepentheorie, een zeer effectief formeel systeem dat zijn bruikbaarheid heeft bewezen door het begrijpelijk maken van de structuur van de materie op atomair niveau. De groepentheorie houdt zich bezig met patronen en verhoudingen, met de wezenlijke gelijkheid van dingen die verborgen is onder hun oppervlakteverschillen, op een manier die veel lijkt op die waarop het werk van Chomsky in de linguïstiek zich bezighoudt met universalia, invariante taalelementen, hoewel talen toch betrekkelijk oppervlakkig van elkaar verschillen.

De groepentheorie is zeer abstract en algemeen. Ze stelt wetenschappers in staat betekenis te ontfangen aan de verborgen wereld van de atomaire microkosmos door haar bijzondere vermogen informatie voort te brengen over de *structuur* van gebeurtenissen, zelfs als deze zelf niet kenbaar zijn. In de wetenschap verenigt de theorie ongelijksoortige zaken door hun gemeenschappelijke, onderliggende vorm te onthullen. Uiterlijkheden worden weggekrabd, het specifieke genegeerd, zodat de wezenlijke zaken, de abstracte, invariante verhoudingen, de onveranderlijkheid te midden van de verandering, zich kenbaar maken.

James R. Newman vergeleek in een van zijn wiskundige essays het functioneren van de groepentheorie met een archeoloog die een verdwenen stad opgraaft: hij legt de oppervlakte van de heuvels open om het metselwerk eronder te bereiken; vervolgens graaft hij in het puin van huizen om ornamenten en vaatwerk bloot te leggen; dan baant hij zich een weg door graftombes om sarcofagen te vinden en ten slotte ontdoet hij de mummies die hierin worden gevonden van hun windsels.

De groepentheorie is zelfs nog abstracter dan de algebra. In de algebra hebben de x en de y geen vaste waarden, maar bewerkingen als optellen en aftrekken zijn in elk geval gedefinieerd. In de groepentheorie zijn zelfs die niet duidelijk. Een groep bestaat uit een klasse of verzameling van elementen die getallen, vierkanten, atomen of een vaag, niet omschreven 'denkobject' kunnen zijn. De elementen kunnen ook een klasse van bewerkingen zijn, die ergens op worden uitgevoerd.

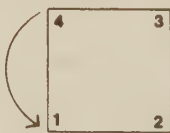
Veronderstel dat de klasse van elementen in kwestie de verzameling van alle gehele getallen is. Een van die getallen, opgeteld bij zichzelf, resulteert doorgaans in een ander getal. Dit door optelling verkregen tweede getal is eveneens lid van de klasse van gehele getallen. Het eerste getal is door de bewerking getransformeerd, maar hoewel het in het ene opzicht anders is, is het in een ander opzicht gelijk. Vier plus vier is acht. Acht is duidelijk niet gelijk aan vier, maar acht heeft het invariante element behouden dat het ook een geheel getal is. Het behoudt de eigenschap van de groep.

Wil een klasse van elementen in wiskundige zin een groep vormen, dan moet aan bepaalde voorwaarden zijn voldaan. Een van die voorwaarden is de regel dat als de elementen A en B lid zijn van de betreffende klasse, de combinatie van A en B door een bewerking, bijvoorbeeld optellen of aftrekken, in een element resulteert dat ook lid is van die klasse. Een andere voorwaarde is dat er een 'identiteitselement' in de klasse moet zijn, zodanig dat wanneer dit wordt gecombineerd met een element A van die klasse, het resultaat weer A is, ongewijzigd door de bewerking. In simpele rekenkunde is de som van vier en nul nog steeds vier, en het produkt van vier en één eveneens. Hier zouden de identiteitselementen nul respectievelijk één zijn. Een andere regel stelt dat er een element moet bestaan dat in de identiteit resulteert als het met een willekeurig ander element wordt gecombineerd. Alleen als aan al deze voorwaarden is voldaan, kan de klasse van elementen een groep worden genoemd.

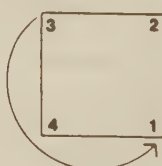
Een groep kan ook bestaan uit een klasse van bewerkingen die in volgorde achter elkaar worden uitgevoerd. In dit geval moeten twee willekeurige bewerkingen leiden tot een resultaat dat ook met een enkele bewerking verkregen had kunnen worden. Deze bewerkingen kunnen bestaan uit het bewegen van bepaalde voorwerpen, het veranderen van hun positie of hun vorm. Een bekend voorbeeld is de klasse van bewerkingen die een eenvoudig vierkant om zijn eigen as laat draaien. In de figuur hieronder zijn de hoeken van de vierkanten genummerd om de veranderingen als gevolg van de rotatie te laten zien:



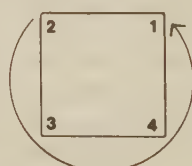
Identiteit
Element I
Geen rotatie



Rotatie
Element A



Rotatie
Element B



Rotatie
Element C

In deze klasse van vier rotaties zijn I, A, B en C de elementen. Het eerste element is geen rotatie, maar een bewerking die het vierkant precies laat voor wat het is, ongewijzigd. Bij de tweede rotatie, A, wordt de hoek linksboven (1) de hoek linksonder enzovoort. Door het optellen van twee rotaties - de een na de ander uitgevoerd - komt het vierkant in een positie terecht die het ook met een enkel rotatie-element had kunnen bereiken. We kunnen identiteits-elementen onbeperkt bij elkaar optellen en toch zal het resultaat steeds weer een identiteitselement zijn: het vierkant blijft ongewijzigd. Door twee A-elementen bij elkaar op te tellen komt het vierkant in een positie die het ook gehad zou hebben als slechts een B-rotatie-element was gebruikt. De combinatie van A en B is equivalent aan C. De resultaten van de combinaties van de onderscheidene rotatie-elementen kunnen worden uitgedrukt in een matrix die er als een afstandentabel uitziet:

		KOLOMMEN			
		I	A	B	C
RIJEN	I	I	A	B	C
	A	A	B	C	I
	B	B	C	I	A
	C	C	I	A	B

In deze matrix is gemakkelijk te zien wat er gebeurt als de rotatie-elementen worden gecombineerd. Op het punt waar de horizontale rij A de verticale kolom B snijdt, staat de letter C. De matrix laat zo op de meest simpele manier zien dat het resultaat van de combinatie van A en B C is. Om een ander voorbeeld te geven: het element C, de grootste rotatie, gecombineerd met het element A, de kleinste rotatie, draait het vierkant over een hele cirkel en laat het precies waar het eerst was. Dit is equivalent aan het identiteits-element I, dat wil zeggen aan geen enkele rotatie. In de tabel snijden de rij C en de kolom A elkaar in I.

De matrix heeft nog een zeer interessante eigenschap. Bepaalde elementen leveren met zichzelf gecombineerd steeds weer de hele groep van elementen op; andere elementen doen dat niet. Afzonderlijke elementen die op deze manier de hele groep opleveren, heten 'generatoren', een belangrijke term. Een voorbeeld van een generator is het rotatie-element A:

A gecombineerd met A geeft B,
 B ofwel (A gecombineerd met A) gecombineerd met A geeft C,
 C ofwel (A gecombineerd met (A gecombineerd met A)) gecombineerd met A geeft I,
 I ofwel (A gecombineerd met (A gecombineerd met (A gecombineerd met A))) gecombineerd met A geeft A.

Aldus worden alle vier leden van de groep gegenereerd door A eenvoudig stapsgewijs tot zijn vierde macht te verheffen. Maar niet alle elementen hebben deze eigenschap. B gecombineerd met zichzelf levert slechts twee leden van de groep op, de een na de ander in eindeloze herhaling:

B gecombineerd met B geeft I,
I ofwel (B gecombineerd met B) gecombineerd met B geeft weer B,
B gecombineerd met B geeft weer I,
I ofwel (B gecombineerd met B) gecombineerd met B geeft weer B.

En zo vervolgens tot in eeuwigheid.

De Amerikaanse psychologen Robert Shaw en Buford Wilson, die beiden instemmen met de grote lijnen van Gibsons theorie van perceptuele invarianten (volgens welke de hersenen aandacht besteden aan de onveranderlijke elementen van zintuiglijke indrukken), kwamen met de intrigerende gedachte dat de perspectivische projecties van vaste lichamen, de verschillende gezichtspunten vanwaaruit ze door een waarnemer kunnen worden gezien, een groep vormen. Shaw en Wilson veronderstellen dat bij veel voorwerpen enkele projecties al genoeg zijn om ons voldoende informatie te verschaffen om de hele vorm van het voorwerp te kunnen specificeren, omdat sommige projecties generatoren van de hele groep van projecties zouden kunnen zijn. Om te beseffen wat het voorwerp werkelijk is, is gewaarwording van alle projecties niet noodzakelijk. Dit is een nieuwe en opwindende benadering, die de hersenen van de noodzaak ontslaat te raden hoe de wereld 'echt' is. Deze benadering suggereert bovendien dat het conceptuele denken, zoals het waarnemen, sommige genererende principes van dezelfde groep zou kunnen gebruiken, aangezien de hersenen bij abstract geestelijke processen ertoe neigen onvolledige informatie aan te vullen.

Shaw en Wilson geloven dat begrip van wat een groepsgenerator is zou kunnen leiden tot nieuwe inzichten ten aanzien van de vraag hoe de mens zijn wereld waarneemt en hoe hij haar kent. Zij wijzen er echter met nadruk op dat dit niet een natuurkundig of psychologisch model is in de aanvaarde betekenis van het woord, maar eerder een 'ecologisch' model dat licht werpt op de manier waarop de mens met de wereld rondom hem in wisselwerking staat. Het geestelijke en het stoffelijke harmoniëren op systematische wijze. Zoals Shaw en zijn medewerker Michael McIntyre het stelden: "Ideeën zijn niet in de geest, noch zijn ze voorwerpen in de wereld, maar... beide bestaan in de ontmoeting van geest en materie."

De wereld wordt niet binnen in het hoofd geconstrueerd. Aan de andere kant is het brein geenszins een passieve buitenstaander die alleen maar registreert

en afschriften maakt van elke boodschap die hem van buitenaf bereikt. We kunnen bijzondere voorvallen vergeten en toch het abstracte systeem van verhoudingen bewaren dat de complete groep genereert, inclusief de vergeten delen, door middel van partiële informatie. De perceptie van de vorm van een voorwerp hangt niet af van een uitputtend gedetailleerd onderzoek van die vorm, maar van een verzameling juist-geordende projecties ervan, anders gezegd, van zijn generatorenverzameling. Het menselijke gezicht ondergaat verandering door de lijnen en rimpels van het ouder worden, maar er blijft genoeg gezichtsstructuur invariant om het gemakkelijk herkenbaar te doen zijn, ongeveer zoals de overdreven onvolledige gelaatstrekken van een politicus in karikaturen herkenning door de doorsneekrantelezer eenvoudiger maken en niet moeilijker.

Shaw en Wilson beschouwen de groepentheorie als een wiskundig helder principe dat belangrijk zou kunnen zijn voor het onderwijs in hogere vormen van kennis, zoals de natuurwetenschappen, filosofie, wiskunde, kunst, geschiedenis en rechten. In deze wetenschappen zou het brein tijdens het leren half-automatisch een abstracte structuur van verhouding kunnen verwerven op grond van goedgekozen voorbeelden - 'kernbegrippen' - die dan vollediger kennis zouden genereren. Beide psychologen komen tot de slotsom dat het deskundige oordeel 'eerder een bijproduct is van generatieve kennissystemen dan van interne massa's feitelijke informatie'. Een student zou deze onbewuste kennisstructuren waarschijnlijk onthullen door zijn neiging tot verwerping van irrelevante informatie, maar dan wel uit de verkeerde veronderstelling dat nieuwe, relevante informatie helemaal niet nieuw is, maar reeds ervaren. Dit zou het resultaat zijn van het vermogen om een geheel uit de delen te genereren, als het maar de juiste delen zijn. Shaw en Wilson merken op:

Een belangrijk inzicht dat uit de studie van dergelijke zaken naar voren komt, is dat er voor generatieve concepten nooit echt nieuwe gevallen bestaan. Er bestaan alleen gevallen die actueel zijn omdat ze tot een generatorenverzameling behoren, en gevallen die potentieel zijn omdat ze sluimeren te midden van het resterende geheel van gevallen.

Bijgevolg bestaat het enige onderscheid tussen actuele en potentiële gevallen uit de vraag of het geval manifest is geworden door toepassing van het generatorprincipe. Als dat zo is, draagt een nieuw voorval geen merkteken van zijn recente ontstaan om aan te geven dat het eerder nieuw dan oud is.

Een organisme is rechtstreeks met de wereld verbonden en de evolutie heeft de band zodanig ontworpen dat ze als een handschoen past, omdat het brein erop is afgestemd om precieze informatie te verwerven over de specifieke omgeving waarin het organisme woont. 'Een waarnemer is een *zichzelf afstemmend* systeem,' aldus Gibson. Zo'n benadering heeft een prikkelend effect omdat ze psychologen dwingt aandacht te schenken aan de rijkdom en onbepaalde subtiliteit van de informatie in de omgeving en ze ons waarschuwend eraan herinnert dat de mens ertoe is uitgerust om de bestaande wereld,

zijn ecologisch leefmilieu, te beheersen en niet om in een laboratorium te zitten terwijl psychologen hem bestuderen en hem lange lijsten met onzinnige lettergrepen voorlezen.

Maar de uitspraak dat de evolutie ons waarnemingssysteem heeft gevormd voor het nuttige doel ons een weg in de wereld te laten vinden met nauwkeurigheid en objectiviteit als enige criteria, onderwerpt de psychologen aan dezelfde kritiek als die welke Chomsky uitoefende op theorieën die de taal beschouwen als niet meer dan een algemene communicatieverordening. Waarneming kan in de evolutie zijn ontstaan om het probleem van de koersbepaling in de omgeving op te lossen, maar dat doel hoeft ze nu niet te hebben. Het is duidelijk dat waarneming tenminste haar eigen esthetische voorkeurregels heeft, die nauwelijks een strategie voor het overleven in darwinistische betekenis zijn. Er is geen eenvoudig verband tussen dat wat het oog binnentreedt en dat wat we als zien ervaren. Shaw en McIntyre, die het denkbild verwerpen dat waarneming een voorbewust proces van het construeren van visuele ervaring uit willekeurige gegevens is, geven toe dat er

bewijs lijkt te zijn dat de perceptuele aanpassing van stoffelijke informatie nieuwe informatie zou kunnen creëren die psychologische waarde heeft.

Waarnemen is een persoonlijke handeling die nooit onbevangen wordt uitgevoerd. Het oog ondergaat geen indrukken terwijl het bewegingloos observeert. Integendeel, het is uiterst actief. Als het ergens naar kijkt, springt, siddert en danst het eromheen. Zolang het oog beweegt, ziet het echter niets. Alleen wanneer het tussen de sprongen door een fractie van een seconde rust, stuurt het een boodschap, een pakket informatie, terug naar de hersenen. Op basis van deze afzonderlijke vloedgolven van gegevens beslissen de hersenen waar het oog vervolgens naartoe zal springen. De bewegingen van het oog volgen niet de omtrek van het voorwerp om daar een afschrift van te maken, maar concentreren zich op saillante kenmerken die voor de kijker van belang zijn. Verschillende kijkers maken verschillende bewegingen en zelfs een en dezelfde kijker maakt niet steeds dezelfde oogbewegingen als hij naar hetzelfde voorwerp kijkt. Er bestaat een voortdurende cybernetische terugkoppeling tussen wat de ogen zien en de bewegingen die zij maken.

Zelfs wanneer het oog helemaal bewegingloos lijkt en gefixeerd naar een punt staart, maakt het verschillende malen per seconde kleine, snelle bewegingen waardoor het beeld over het netvlies verschuift. Deze abrupte verschuivingen, en niet het voorval zelf, produceren een reactie in de zenuwcellen van de hersenen. Een oog kan onmogelijk tijdens een voorval alles tegelijk waarnemen. Op een hoger verwerkingsniveau in het visuele systeem van de hersenen mogen slechts zo'n duizend neuronen vuren als ogen een behoorlijk ingewikkeld voorwerp bekijken. Belangrijke kenmerken worden opgenomen en onbelangrijke genegeerd en als de informatie verderop in de hersenen wordt verwerkt, reageren de cellen met hoe langer hoe meer onderscheid. Handeling, doel, keuze en beheersing zijn in elk cybernetisch systeem

van wezenlijk belang en de manier waarop de hersenen zien wat ze zien vormt daarop geen uitzondering.

Hoe minder eenvoudig het verband is tussen de aan de zintuigen aangeboden informatie en wat de hersenen daarmee doen, des te waarschijnlijker is het dat de strategieën van het weten niet uniform zijn, maar van persoon tot persoon verschillen. Waarnemen is persoonlijk en uniek, evenals leren en onthouden. Zelfs deskundigen die dezelfde hoeveelheid kennis met dezelfde opleidingsmethode hebben verworven en dezelfde leerboeken hebben gelezen, gebruiken die kennis op verschillende, individuele manieren om eenzelfde probleem op te lossen.

Waarneming is niet alleen door haar aard niet-uniform, maar er zijn bovendien aanwijzingen dat mensen die creatiever zijn dan anderen de neiging vertonen vanuit ongewonere gezichtspunten tegen de wereld van vormen en voorwerpen aan te kijken. Een aantal Amerikaanse schoolkinderen werd gevraagd in tien minuten zoveel tekeningen te maken als ze konden; een cirkel diende het uitgangspunt van elke tekening te zijn. Sommige kinderen tekenden alsof de voorwerpen onder een ongebruikelijke hoek werden gezien - van onderen, van binnenuit, van veraf, van heel dichtbij - of zij werden in een onverwachte relatie tot andere voorwerpen uitgebeeld. Andere kinderen hielden zich aan de gebruikelijke perspectieven vanwaaruit de dingen normaliter worden waargenomen. Twaalf jaar later kregen de deelnemers van de test een vragenlijst voorgelegd, waarin hun werd gevraagd of zij toneelstukken, boeken, gedichten of liedjes hadden geschreven, of wetenschappelijk onderzoek hadden gedaan, iets hadden uitgevonden of een eigen zaak waren begonnen. Men vond een duidelijke relatie tussen de kinderlijke neiging om dingen vanuit een ongewoon perspectief te zien en originele, creatieve activiteiten op latere leeftijd.

Voor waarneming is net als bij taal een anti-toevalsinstrument nodig. De groepentheorie verschaft dit instrument omdat het bepaalt dat niet zo maar elk element het geheel op grond van partiële informatie kan genereren, maar dat alleen een behoorlijk geordende verzameling van elementen die onderling door statistische regels verbonden zijn dat kan; met andere woorden, door redundantie. In de opvatting van Gibson zoekt het brein naar invarianten tussen de veranderlijke indrukken die het oog bereiken. Ook dit is een informatieproces.

De scheur dwars door menig wetenschappelijke 'verklaring' van de werking van de geest is de niet op het eerste gezicht inzichtelijke vooronderstelling dat er rechtstreekse, transparante manieren kunnen bestaan om de wereld te kennen. Dit denkbeeld wordt vaak gekoppeld aan de overtuiging dat ervaring in het dociele brein wordt afgedrukt. Ervaring is echter veranderlijk, wat we ook al verwachtten, omdat er zonder verandering geen informatie is. Maar zonder redundantie bestaan er alleen ruis en fouten. Iets dergelijks moet Shannon voor ogen hebben gestaan toen hij op de mogelijkheid wees dat de mens 'een ideale decodeerder' is.

18. BODEM EN PIEK VAN HET GEHEUGEN

Men is het er algemeen over eens dat er een 'syntaxis' van het geheugen moet bestaan. Informatie is gemakkelijker te onthouden als deze geordend is, rijk aan patronen en structuur, samenhangend en veel redundantie bevattend. Ongeordende informatie die in het geheel geen structuur bezit, wordt gauw vergeten.

Dit is geenszins een moderne ontdekking, maar een die teruggaat tot de vijfde eeuw voor Christus toen de Griekse dichter Simonides van Ceos liet zien dat een effectieve methode van onthouden bestaat uit het aanbrengen van verbanden tussen dingen die geen verwantschap lijken te hebben. Tijdens een door een Thessalische edelman gegeven banket droeg Simonides een gedicht voor ter ere van de hemelse tweeling Castor en Pollux. De edelman was niet bijzonder ingenomen met dit gedicht, dat Castor en Pollux buitensporig veel lof toezwaaide en hem niet genoeg. Nijdig halveerde de edelman het loon van de dichter. Later op de avond werd Simonides door een bode uit de zaal gehaald met het nieuws dat er twee jonge mannen, waarschijnlijk de Castor en Pollux zelf, op hem stonden te wachten. Toen Simonides eenmaal buiten was en tevergeefs naar de bezoekers uitzag, lieten de goden het dak van de feestzaal instorten. De edelman en zijn gasten werden gedood en in zo sterke mate verminkt dat hun naaste verwanten de stoffelijke resten niet konden identificeren.

Simonides wist echter de namen van de slachtoffers omdat hij zich de plaats herinnerde die elke gast aan de feesttafel had ingenomen. Hij liep in volgorde de gezichten voor zijn geestesoog af. Op grond van deze ervaring kwam hij tot de slotsom dat orde en structuur het geheim van een goed geheugen zijn. Hij ontwikkelde een systeem om rijen woorden en denkbelden te onthouden door ze zich zo voor te stellen dat ze, in volgorde gerangschikt, deel uitmaakten van een vertrouwde omgeving, zoals een huis. Dat wat hij wilde onthouden werd een plaats in bepaalde delen van de kamers van het huis toegedacht, 'zodat de orde de plaatsen van de dingen zal handhaven.' Verband en patroon waren de sleutel tot dit systeem. Na de klassieke oudheid dook de grondgedachte in verschillende vormen opnieuw op. In haar voortreffelijke en veelvuldig geciteerde boek *The Art of Memory* oppert Frances Yates dat een methode om Dantes *Inferno* te begrijpen eruit zou kunnen bestaan het boek op te vatten als een vernuftig systeem om de hel en haar straffen in gedachten te houden door elk type zondaar in het juiste deel van het kosmische bouwwerk te plaatsen en een hoog geordende structuur te scheppen waarin de kringen van de hel het tegendeel van die van de hemel zijn.

In de renaissance werden er fantastische geheugenmachines ontworpen, zoals het houten geheugentheater van Giulio Camillo dat in zeven niveaus was verdeeld die elk een stadium in de evolutie van de wereld voorstelden, te

beginnen bij de schepping en eindigend bij de toppen van de menselijke wijsheid en kennis. De niveaus worden langs zeven gangpaden bestegen die de zeven destijds bekende planeten voorstellen. Camillo's theater was een methode om de kennis van het heelal te ordenen met gebruikmaking van het belangrijke psychologische gegeven dat nieuwe informatie beter wordt onthouden als zij is ingebed in de bredere context van door persoonlijke ervaring verkregen informatie.

In een recenter verleden maakte Mark Twain (1835-1910), als hij een toespraak in een hem vreemde stad moest houden, eerst een wandeling door een park en beeldde zich in dat de ideeën voor zijn redevoering op een bank zaten, aan een boom hingen of aan een fontein of een muziekkapel waren vastgemaakt. Twain kon dan twee uur aan een stuk door praten zonder aantekeningen te gebruiken, door in zijn verbeelding weer door het park te slenteren en zo zijn gedachten in de juiste volgorde te 'zien'.

Om te onthouden zijn hersenen niet blij met willekeur. Ze zoeken naar wegen om de entropie van een verzameling onderwerpen te verlagen door het aantal manieren waarop ze kunnen zijn gerangschikt terug te brengen. Ze verminderen de waarde van W in Shannons vergelijking $S = k \cdot \log W$ en verkleinen daarmee de entropie S . Ze proberen de onderwerpen zelfs in een unieke volgorde onder te brengen. Als de onderwerpen geen zichtbaar verband of waarneembaar patroon vertonen, zullen de hersenen naar eigen inzicht een orde aan de wanordelijkheid van het materiaal opleggen. Een rij onderwerpen waarvan elk onafhankelijk is van alle anderen, is gewoon ruis. Het geheugen heeft weinig op met ruis; het heeft een boodschap nodig. Duidelijk treden hier overeenkomsten aan het licht met de taal, waarin letters en woorden elkaar evenmin in een willekeurige volgorde mogen opvolgen, en met de waarneming, die op zoek is naar invarianten tussen de veranderlijke zintuiglijke indrukken die het oog bereiken.

De meeste mensen die verscheidene woorden moeten onthouden, slagen veel beter in hun opdracht als zij deze woorden in een soort structuur, bijvoorbeeld van categorieën en klassen, ordenen. Goede leerlingen bedenken zelf een patroon dat samenhang geeft aan een rijtje willekeurig gekozen woorden en brengen daarbij de meest onwaarschijnlijke verbanden tussen het ene woord en het volgende aan. Als gevolg daarvan worden de woorden beter voorspelbaar, zoals in een boodschap die redundantie bevat.

Een veel gebruikte methode om lange rijen onsamenvangende woorden te onthouden is deze in verhaalvorm onder te brengen, waarin de ene gebeurtenis naar de volgende leidt in een aaneenschakeling van vaak zonderlinge voorvallen. In het bekende geheugenspelletje waarin de deelnemers tien woorden moeten onthouden of anders een boete betalen, is het geheim de woorden in een verhaal te vlechten; hoe absurder dat verhaal is, hoe beter. In zo'n spelletje werd bijvoorbeeld het volgende rijtje

VERZET
WALGING
RAAM
OVERSCHOENEN
PIRAAT
VETER
PEPERBUS
BUSHALTE
HEMDSLIP
MARMELADE

spontaan tot het volgende denkbeeldige scenario verwerkt: Een verzetstrijder die in Parijs woont, leest *Walging* van Sartre. Hij hoort regendruppels op het raam, trekt zijn overschoenen aan en rept zich naar de boulevard St. Germain waar het water zo hoog staat dat een piratenschip voorbijzeilt met een lading gekaapte veters en peperbussen. Hij drijft naar een bushalte die boven het wateroppervlak uitsteekt en meert zichzelf daaraan af met zijn hemdslip, waarna hij zijn knagende honger stilt door een pot marmelade te consumeren.

Het verhaal - en daarmee het rijtje woorden - kan gemakkelijk worden opgeslagen in het geheugen. Spelers van dit soort geheugenspelletjes is vaak het ongewoon droomachtige karakter van de uit willekeurige woorden samengestelde verhaaltjes opgevallen, wat de interessante vraag oproept of er misschien een verband tussen geheugen en dromen bestaat.

We hebben al gezien dat redundantie in gedrukte tekst bepaalde volgorden van letters en woorden voorspelbaarder maakt dan andere. Grotere redundantie is dan ook vrijwel gelijk aan grotere voorspelbaarheid. De twee typen redundantie, te weten D^1 , de context-onafhankelijke, en D^2 , de context-gevoelige, dragen ertoe bij het onverwachte van een boodschap te vermindere en geven structuur en patroon aan wat anders hoogst onverwachte reeksen symbolen zouden zijn. Shannon experimenteerde met deze verschillende soorten redundantie. Hij liet willekeurig gekozen woorden onzinnige zinnen genereren. Vervolgens stelde hij als voorwaarde dat de woorden gemiddeld even vaak mochten voorkomen als in betekenisdragend Engels proza. De zinnen waren nog steeds erg willekeurig, maar ze bevatten nu een context-onafhankelijk type redundantie: ze waren niet meer zo willekeurig als ze hadden kunnen zijn. Het resultaat was een zin als deze:

REPRESENTING AND SPEEDILY IS AN GOOD APT OR COME CAN
DIFFERENT NATURAL HERE HE THE A IN CAME THE TO OF TO
EXPERT GRAY TO FURNISHES THE LINE MESSAGE HAD BE
THESE.

Als de context-onafhankelijke redundantie constant werd gehouden en de context-gevoelige redundantie werd verhoogd, waardoor de kans op het verschijnen van een bepaald woord werd beïnvloed door het woord dat er onmiddellijk aan voorafging, ontstond er een behoorlijker, zij het nog nauwelijks begrijpelijke zin:

THE HEAD AND IN FRONTAL ATTACK ON A ENGLISH WRITER
THAT HE CHARACTER OF THIS POINT IS THEREFORE ANOTHER
METHOD FOR THE LETTERS THAT THE TIME OF WHO EVER
TOLD THE PROBLEM FOR AN UNEXPECTED.

Shannon stelde belang in de hoeveelheid redundantie in Engels proza en in de vraag hoe die de betrouwbaarheid van de tekst zou kunnen beïnvloeden. Tegenwoordig zijn psychologen geïnteresseerd geraakt in het effect van redundantie op het geheugen. Zij hebben vastgesteld dat mensen zich zinnen beter kunnen herinneren naarmate deze meer context-gevoelige redundantie bevatten en zinnen die weinig of geen redundantie hebben slecht onthouden. Duidelijk werd dat de meeste mensen de onmiskenbare verandering registreren die optreedt als ongeorganiseerde woordenstromen structuur krijgen. Er wordt een grens overschreden met vérstrekkende gevolgen voor de effectiviteit van het geheugen.

De psycholoog John Bransford gelooft dat een belangrijk doel van aanleeren geheugentheorieën moet zijn het duidelijk omschrijven van de aard van de georganiseerde structuur die schuilt onder ons besef van begrip, onze beheersing van de stof. Belangwekkend genoeg blijft dit gevoel voor structuur, dat zo'n effect op het onthouden lijkt te hebben, niet beperkt tot de zinsoppervlakte. Het penetreert de oppervlakte tot het abstractere niveau van de 'diepe' of conceptuele structuren die aan de oppervlaktevorm ten grondslag liggen.

Het klassieke zinnenpaar van Chomsky,

John is eager to please

John is easy to please*

heeft een gelijksoortige oppervlaktevorm, maar de onderliggende conceptuele structuur, die de bedoeling van de spreker bevat, is zeer verschillend, zoals we al hebben gezien. Samen met andere, op deze gelijkende, zinnen werden zij tijdens een geheugentest hardop aan studenten voorgelezen. Enige tijd later werd hun gevraagd de zinnen uit hun geheugen op te roepen en daarbij kregen ze alleen het eerste woord van elke zin als aanwijzing. Hoewel in Chomsky's

*Bij rechtstreekse vertaling in 'John is er tuk op om te behagen' en 'John is gemakkelijk te behagen' gaat de overeenkomst in oppervlaktestructuur verloren. De Nederlandse (psycho)linguïstiek hanteert daarom meestal de originele voorbeelden van Chomsky.

zinnen 'John' beide keren het sleutelwoord is, bleken de studenten 'John is eager to please' beter te onthouden dan 'John is easy to please'. Bransford veronderstelt dat de reden voor dit merkwaardige resultaat het feit is dat John in de dieptestructuur van de eerste zin een rol in twee gebeurtenissen speelt: hij is 'eager' en hij 'pleases'. In de dieptestructuur van de tweede zin speelt hij slechts in één opzicht een rol: het is gemakkelijk (voor iemand) om John tevreden te stellen. Het is duidelijk dat de hersenen niet zonder meer woordenreeksen opslaan zoals ze die hebben 'gehoord' of 'gelezen'. Zelfs al zouden alle zinnen van een opsomming hetzelfde aantal woorden omvatten, dan worden ze toch niet alle even goed onthouden omdat de ingewikkeldheid van hun conceptuele structuur kan variëren. Zoals Bransford aantoonde, onthouden mensen zelden geschreven of gesproken tekst woord voor woord. Als hun wordt gevraagd deze te herhalen, nemen ze hun toevlucht tot het parafraseren van de inhoud, wat erop wijst dat ze beter in staat zijn de betekenis van de stof op te nemen dan een woordelijke kopie van elke zin in hun geest te prenten. We vergeten de oppervlaktestructuur, maar bewaren de abstracte betrekkingen die in de dieptestructuur zijn opgenomen. Onderworpen aan psychologische tests denken mensen vaak zinnen te herkennen die zij beslist nog nooit eerder hebben gehoord. Dit zou kunnen worden toegeschreven aan het feit dat deze zinnen weliswaar een andere oppervlaktestructuur bezitten dan die van eerder gegeven zinnen, maar dat ze in hun dieptestructuur dezelfde betrekkingen vertonen.

Afhankelijkheid van structuur noemt Chomsky een van de universele eigenschappen van taal. Dit is iets dat altijd in de regels van elke menselijke taal zal worden aangetroffen. Op een nog niet geheel begrepen manier is het geheugen ook afhankelijk van het structureren van informatie, van het maken van patronen, en het is het feilbaarst als er geen patroon bestaat. De mens kan willekeurige en onsamenhangende woordenreeksen onthouden, maar dit gaat hem niet eenvoudig af en evenmin lukt dit hem erg lang. Als de reeksen geen zichtbare structuur hebben, zal iemand met een goed geheugen deze reeksen in een zelfbedachte structuur onderbrengen. Maar geheugentheoretici hebben geleerd op te passen voor gemakkelijke antwoorden op fundamentele vraagstukken als hoe dit ongrijpbare geestelijke proces het allemaal klaarspeelt. Bij bepaalde geheugenopdrachten kunnen de hersenen de stof in een rangorde onderbrengen en de onderwerpen in klassen groeperen en deze klassen weer in grotere, net zoals de families, soorten en geslachten bij dierkunde. Maar deze methode van onthouden is niet algemeen. Een ander kan onder andere omstandigheden het materiaal in lussen, cirkels of rechte lijnen ordenen. Er zal altijd wel een structuur zijn, maar deze verandert afhankelijk van de stof, de manier waarop de stof wordt ervaren en het doel dat de betrokkene met deze kennis wil bereiken, als deze kennis eenmaal de zijne is geworden. De 'syntax' van het geheugen - de formele patronen die aan informatie worden opgelegd teneinde deze in de geest te kunnen opslaan - heeft, net als bij taal, te maken met betekenis en toepassing en deze relatie kan voor elk individu anders zijn: dit is bepaald

een alarmerend vooruitzicht, zodat wetenschappers, begrijpelijk genoeg, zich niet graag in deze materie storten.*

De Amerikaan James J. Jenkins is een psycholoog die directer dan de meesten te maken heeft gehad met het idiosyncratische karakter van het geheugen en de lastige problemen waarvoor een ieder zich gesteld ziet die een allesomvattende theorie voor het onthouden en aanleren probeert op te stellen, een theorie die net als de mechanica altijd en overal geldt - en op elk individu van toepassing is. Jenkins' artikelen zijn buitengewoon leesbaar en dragen opgewekte titels als *'Remember That Old Theory of Memory? Well, Forget It!'* (Herinnert u zich die oude geheugentheorie? Wel, vergeet die maar!). Zelf hield hij vast aan een 'oude' geheugentheorie uit de jaren vijftig die was gebaseerd op de vooronderstelling dat complexe geestelijke gedragingen net als machines zijn opgebouwd uit eenvoudige componenten, en dat deze gedragingen automatisch blijven functioneren zolang de machine loopt. Vroeg in de jaren zestig verwierp Jenkins deze stelling en gaf daarmee de hoop op dat kennis van het inwendige mechanisme van een dergelijke machine volledig begrip van het geheugen zou opleveren. Uiteindelijk nam hij aan dat het onthouden in een psychologische en lichamelijke context plaatsvindt die niet alleen zelf verandert, maar bovendien is ingebed in een alsmaar bredere verzameling van contexten, zodat de verwachting van spijkerharde geheugenwetten die onder alle omstandigheden van toepassing zijn veel weg heeft van het geloof in een laplaceaanse superintelligentie die de toestand van elk molecuul in het universum kent.

De oude benadering van het geheugen was 'ondersteboven', bottom-up. Men nam aan dat de wetenschap kon beschrijven wat er gebeurt door te beginnen bij de fundamentele ordenende principes in de hersenen en vervolgens

* Specialisten op het gebied van hartaandoeningen bij kinderen hanteren zeer persoonlijke methoden om een hoeveelheid kennis op te slaan en weer te voorschijn te halen. De psycholoog Paul Johnson die deze artsen vijf jaar bestudeerde, stelde vast dat zij niet, zoals medische studenten en co-assistenten, door een langzaam en grondig proces van logische deductie tot een diagnose komen, maar deze keten van afwegingen bekorten en snel tot een oordeel overgaan op grond van wat een magisch inzicht lijkt, maar waarschijnlijk is toe te schrijven aan de speciale manier waarop zij informatie in hun geheugen hebben opgenomen. De nieuwkomer probeert alle informatie die hij heeft geleerd te onthouden en tracht langs de formele weg conclusies af te leiden. De specialist weet evenveel als de nieuwkomer maar hij roept een kleinere klasse van gedachten, waarvan het aannemelijker is dat ze juist zijn, in zijn herinnering op.

Deze gereduceerde verzameling van gedachten is zeer strategisch in het geheugen ondergebracht, zodat zij snel kan worden opgeroepen. Als zij onjuist blijkt te zijn, wordt de volgende in waarschijnlijkheid opgeroepen. Een dergelijke manier van denken wordt heuristisch genoemd en blijkt onder specialisten op velerlei gebied algemeen te zijn. Maar terwijl aankomende deskundigen veelal langs dezelfde weg van de gestandaardiseerde deductiemethode een probleem benaderen, zijn de deskundigen

toe te werken naar het gedrag van de persoon tijdens het proces van onthouden, ongeveer zoals de 'oude' visie op taal veronderstelde dat zinnen volledig kunnen worden verklaard door hun interne structuur en de letterlijke betekenis van elk woord te bestuderen. Na jaren van opwindend en succesvol onderzoek van woordassociaties die de mechanistische theorie leken te bevestigen, besloot Jenkins dat de bottom-uptheorie, die begon bij de bouten en moeren van een hypothetische geheugenmachine in de hersenen, niet deugde, hoewel deze op dat moment hoe langer hoe meer populariteit aan het verwerven was.

Een betere manier, dacht hij, was van 'boven naar beneden' (top-down) te werken en te beginnen bij iemands totale ervaring van de te onthouden informatie. Als we het geheugen goed willen begrijpen, dient die ervaring zo natuurlijk mogelijk te zijn, net als in de echte wereld. Geheugenwetten, zo betoogde Jenkins, zijn net als de 'wet' van de effectenhandel die beleggers vertelt laag te kopen en hoog te verkopen. Dat is in theorie een vlekkeloze regel, maar hij is volkomen waardeloos voor de nieuwbakken belegger die hem tracht toe te passen. Wat is laag en wat is hoog? De nieuwkomer kan daar niet achter komen door enkel naar de aandelenkoers van een dag te kijken. Alleen als die koers wordt geplaatst in de context van informatie over de koersen van de voorafgaande twaalf maanden is een vaag antwoord mogelijk. Hoe breder de context, des te beter is het antwoord. Een context heeft echter geen vaste begrenzingen, zoals we hebben gezien. Ze breidt zich, net als de context van een gesprek, in steeds wijdere kringen uit. Of iemand in staat zal zijn informatie te onthouden, hangt af van het gegeven wat voor *betekenis* de hele ervaring voor hem heeft en wat er van hem wordt verwacht als hij deze oproept. Dat is de formidabele uitdaging die voor psychologen uitgaat van de top-downbenadering inzake begrip over het geheugen. Het geheugen tot stilstand brengen, zodat het eens en voorgoed kan worden gedefinieerd, lijkt dan ook uitgesloten. Wat geheugen *is*, hangt af van de context en die verandert steeds. Jenkins gelooft dat het bestaan van vaste en definitieve geheugenwet-

zelf in hun methoden veel minder uniform en voorspelbaar. Er treden enorme persoonlijke verschillen aan het licht. Een cardioloog die op zeker speelt, kan het hele gebied van mogelijkheden voor een bepaald stel symptomen in zijn geheugen oproepen (maar lang niet zoveel als de aankomend-cardioloog) en hun aantal geleidelijk terugbrengen naarmate hij met zijn diagnose vordert. Een andere, niet minder bekwame cardioloog met iets meer van een gokker in zich, stelt een à twee mogelijkheden voor en gaat daarmee verder tot een ervan afvalt en hij naar de volgende overstapt. Hij roept een betere verzameling van aanvangsveronderstellingen op dan de eerste arts en weet ook meteen wanneer een veronderstelling door kritisch bewijs wordt weerlegd.

Zijn strategie is gebaseerd op de manier waarop hij de informatie in zijn geheugen heeft geordend en de precieze aard van deze ordening is hem eigen. 'Dit zegt ons onder meer dat het geheugen veel soepeler is dan we willen geloven,' merkt Johnson op. 'Men zou een grote fout maken door te denken dat inhoud op dezelfde manier in het geheugen aanwezig is als in een boek. Informatie wordt op dezelfde wijze in het geheugen opgeslagen als waarop het individu weet dat deze gebruikt gaat worden. Informatie wordt opgeslagen volgens de eisen van de opdracht waarmee hij vertrouwd is.'

ten de zoveelste mythe is die moet worden ontzenuwd. Een geheugenanalyse is alleen iets waard voor een omschreven en beperkt doel. 'Elke analyse zal uiteindelijk van het onderhavige geval naar een veel uitgebreidere context uitwijken,' aldus Jenkins. 'Dat betekent dat psycholoog-zijn veel moeilijker is dan we denken.'

Het geheugen is geen lagere geestelijke functie die automatisch en onafhankelijk werkt. Om het geheugen te verklaren zou een wetenschapper alle hogere geestelijke functies tegelijkertijd moeten begrijpen, omdat we tijdens het onthouden ervaring construeren en reconstrueren met gebruikmaking van al deze geestelijke functies - perceptie, begrip, conclusie, geloof, taal - ongeacht de vraag of wij ons deze volledig bewust zijn. Op dit punt is Jenkins het eens met William James, die zegt dat geheugen niet verschilt van perceptie, verbeelding, vergelijking of redenatie, het feit daargelaten dat we bij het onthouden al deze geestelijke functies in het verleden plaatsen.

Onthouden is geen vanzelfsprekend proces dat in werking treedt zodra iemand met informatie wordt geconfronteerd. Het gaat zelfs niet automatisch als het de wens en de bedoeling van de persoon in kwestie is om de informatie aan zijn geheugen toe te vertrouwen. Jenkins denkt dat als het geheugen goed werkt, de 'onthouder' die aspecten licht uit de te onthouden gebeurtenis of materie, die een goed omlijnde persoonlijke belevenis mogelijk maakt. Daarom dient hij min of meer te zijn afgestemd op hetgeen hem wordt voorgeschoteld, net zoals de hersenen in de waarnemingstheorie van het licht dat het oog bereikt. Het is de kwaliteit van de ervaring die telt, en die is voor geen enkel mens helemaal gelijk. Kwesties als hoeveel tijd er nodig was om de stof te bestuderen en hoeveel inspanning het kostte om deze in het geheugen op te nemen, zijn van verrassend weinig betekenis.

Belangrijker is de manier waarop een individu persoonlijk de informatie verwerkt, deze met syntaxis en betekenis uitbreidt en in een persoonlijke context plaatst. Hermann Ebbinghaus, de negentiende-eeuwse grondlegger van het wetenschappelijk geheugenonderzoek die in zijn geheugentests nonsens-lettergrepen gebruikte om zeker te zijn dat de zuivere herinnering niet door betekenis was aangetast, vond dat mensen zo'n 80% van wat zij leren binnen vierentwintig uur weer vergeten. Daarna gaat het vergeten langzamer. Dit snelle verlies aan informatie van de bewuste geest werd bekend als de 'vergeetkromme'. Toch is de kromme van Ebbinghaus geen universele wet. Zij is niet van toepassing op onervaren en onbevangen deelnemers aan geheugentests en evenmin als de te onthouden informatie de vorm van een verhaal heeft in plaats van betekenisloze lettergrepen die zorgvuldig van elke samenhang zijn ontdaan. Jenkins vermoedt dat het antwoord op deze schijnbare tegenspraak is dat de onervaren en naïeve deelnemer geïntrigeerd raakt door de nonsens-lettergrepen en daaraan betekenis tracht toe te kennen, er een voorstelling aan verbindt en interessante eigenschappen van het rijtje als geheel opmerkt. Omdat hij ze op deze manier verrijkt en hun kunstmatig ingeperkte context verruimt, slaagt hij er een dag later in zich toch 75% van de let-

tergrepen te herinneren en daarmee de kromme van Ebbinghaus op haar kop te zetten.

Maar dit goede onthouden duurt niet lang als de proefpersoon zijn naïveteit verliest. Als hem een serie tests is afgenomen, realiseert hij zich dat het enige dat hij moet doen is de psycholoog tevreden stellen door de rijtjes te herhalen, onmiddellijk nadat hij ze heeft gehoord. Als hij ze goed heeft, mag hij naar huis. In toenemende mate vereenvoudigt hij zijn geestelijke gedrag om aan de eisen van zijn taak te voldoen. Als gevolg daarvan kan hij zich een dag later bijna niets meer van de rijtjes herinneren en blijkt de kromme van Ebbinghaus weer van toepassing. In tegenstelling tot wat men zou verwachten, is het geestelijke gedrag van iemand voor wie een test een nieuwe belevenis is, gecompliceerder dan dat van iemand die het allemaal al eens heeft meegemaakt, en dat is de reden waarom de informatie in zijn geheugen blijft hangen.

De betekenis is duidelijk een belangrijk bestanddeel van het onthouden. De mens vertoont een uitgesproken vaardigheid in het ontlenen van uiterst ingewikkelde betekenissen aan brokstukken van onsamenhangend materiaal en hij doet dat zonder veel moeite. Nog interessanter is het feit dat hij de betekenissen onthoudt, terwijl hij de exacte vorm van de brokstukken vergeten is. In een beroemd experiment om het abstracte geheugen voor ideeën te testen stelden John Bransford en Jeffrey Franks rijen zinnen van uiteenlopende lengte samen, waarvan er sommige erg eenvoudig, andere minder eenvoudig en weer andere behoorlijk ingewikkeld waren. Tot het hoogste niveau van ingewikkeldheid behoorde een zin als

Het rotsblok dat de berg afrolde verpletterde de kleine hut aan de rand van het bos.

Deze zin werd in delen opgesplitst die als vier kortere en eenvoudigere zinnen werden gepresenteerd:

Het rotsblok rolde de berg af.

Het rotsblok verpletterde de hut.

De hut was klein.

De hut stond aan de rand van het bos.

Studenten die aan de test deelnamen, kregen slechts een paar van deze kortere fragmenten. Van de lange zinnen die de complete ideeënverzameling uitdrukten, kregen ze niets te zien, zodat ze met niet meer dan stukken en beetjes van de volledige betekenis van de complexe zinnen werden geconfronteerd. Evenmin werd de studenten tijd gegund om na te denken over de stof waarmee ze te maken hadden. Zo gauw een fragment was gehoord, werd een vraag

gesteld om hun aandacht af te leiden. Aan het eind van deze testfase werd de volledige rij zinnen voorgelezen en werd hun gevraagd te vertellen hoe vertrouwd elke zin in hun oren had geklonken; de schaal waarop dit kon worden aangegeven liep van vijf punten voor een zin waarvan de student zeker wist dat hij hem al had gehoord, tot min vijf punten voor een waarvan hij even zeker was hem niet te hebben gehoord.

De resultaten voorspelden weinig goeds voor de theorie die stelt dat het geheugen fantasieloos en passief is. In het algemeen gingen de meeste punten naar die zinnen welke alle ideeën verenigden, zelfs als de studenten ze niet eerder hadden gehoord. Kortere zinnen kregen meer punten naarmate ze ingewikkelder waren, ongeacht of de studenten ze nu echt hadden gehoord of niet. De kortste en eenvoudigste zinnen scoorden het laagst. Werkelijke bekendheid bleek nagenoeg niets te maken te hebben met de manier waarop de studenten reageerden. Het enige belangrijke was de vraag of de zin wel of niet verenigbaar was met het volledige, meest complexe denkbeeld dat de studenten aan de korte fragmenten hadden ontleend. Met dit abstracte idee hadden de studenten niet rechtstreeks kennis gemaakt; zij hadden het nooit gehoord. Het was eigenlijk een geestelijke constructie, maar het gedroeg zich alsof het het geheugen was. Zoals in het geval van de taal was de abstractie in staat nieuwe vormen te genereren die vertrouwd leken, maar in werkelijkheid artefacten van het bewustzijn waren.

Uit onsamenhangende elementen wordt een volledige betekenis geconstrueerd en dát herinnert iemand zich. Maar dat wil nog niet zeggen dat het geheugen de oorspronkelijke betekenis intact houdt. De hersenen gaan met informatie aan het werk terwijl deze in het geheugen wordt opgeslagen, geïnterpreteerd, er conclusies uit worden getrokken en veronderstellingen opge maakt en in een context van opgedane ervaring en reeds vergaarde kennis wordt vervat. Als de informatie in de herinnering wordt teruggeroepen, kunnen deze door het brein toegevoegde bewerkingen zich als een geheugen gaan gedragen, zodat men de misleidende indruk krijgt dat de extra informatie deel uitmaakt van de oorspronkelijke boodschap.

Als ze eenmaal in het geheugen zetelen, zijn beide soorten informatie niet gemakkelijk te ontwarren. De studenten die aan de test deelnamen waren er zeker van dat zij de volledige, meest complexe zinnen hadden gehoord die het complete idee uitdrukten, terwijl ze die in werkelijkheid hadden samengesteld uit fragmenten van de betekenis die de kortere zinnen bevatten. De verschillende betekenisstrengen waren zo grondig met elkaar in de knoop geraakt, dat ze niet meer konden worden ontrafeld. Dit verstrengelen van delen tot een totale ervaring lijkt een eenrichtingproces te zijn dat niet omkeerbaar is zonder bewuste inspanning - en zelfs dan nog niet altijd.

James Jenkins wijst erop dat deze verstrengeling, die in de studie van de geest haar eigen geschiedenis heeft, een reden kan zijn waarom de psychologie zo opvallend weinig succes heeft met het ontleden van de esthetische en mystieke belevenis in haar componenten. Hij zegt:

Elke bestudering van kennisstructuren brengt je oog in oog met (deze) versmelting, met dingen waarvan je weet dat je eigenlijk geen idee hebt hoe je ze weet. Er bestaat geen specifiek geheugen; er bestaat alleen maar het residu van het effect. De meeste volwassenen hebben de tafels van vermenigvuldiging in hun hoofd zitten. Zij kennen de uitkomst van het vermenigvuldigen van acht en vijf of van zeven en negen, maar zij hebben geen flauw idee waar ze deze uitkomsten vandaan hebben, op het algemene geloof na dat zij ze op school hebben geleerd. De mens neemt stukjes en beetjes en construeert daaruit een gebeurtenis die hij zich herinnert, maar de stukjes en beetjes vergeet hij weer. Studies van getuigen die beschrijven wat zij zich van een ongeluk denken te herinneren, wijzen erop dat het brein de toedracht kan construeren onder invloed van de vragen die eraan worden gesteld.

De mens neigt ertoe informatie in de context van zijn voorkennis te interpreteren, waardoor twee elementen, het nieuwe en het oude, in het geheugen versmelten. Hij construeert betekenissen en onthoudt de constructies. Er zijn echter ook aanwijzingen die erop duiden dat hij informatie reconstrueert als hij die uit het geheugen te voorschijn haalt. Alleen de kern van de informatie wordt opgeslagen. De details worden bij het terugroepen toegevoegd op grond van wat volgens hem waar is geweest. De reconstructie kan de oorspronkelijke informatie ernstig verdraaien, zonder dat hij zich dat bewust is. Als het voorgelegde materiaal in overeenstemming is met zijn kennis en verwachtingen, is de kans groter dat het juist in de herinnering wordt teruggehaald dan wanneer die overeenstemming ontbreekt en de kans op systematische verdraaiingen aanwezig is. Het verleden wordt onbewust aangepast bij dat wat de betrokkene in het heden weet en verwacht. De taal kent een vergelijkbaar verschijnsel in de patronen van onbewuste verwachting die de deelnemers aan een conversatie hanteren. Als aan de verwachtingen niet wordt voldaan, kan het gesprek verzanden.

Dit alles is nauwelijks een pleidooi voor de opvatting dat het geheugen een automatische machine is. Bransford heeft beschreven hoe de geheugenreconstructie iemand in staat stelt onware antwoorden te geven en toch een test met de leugendetector te doorstaan, of tijdens een proces in volle onschuld een valse getuigenis af te leggen omdat de suggestieve vragen van het kruisverhoor van de aanklager zijn verwachtingen wijzigen en onbewuste veranderingen in zijn geheugen teweegbrengen. Informatie achteraf kan zijn geheugen op andere manieren beïnvloeden. Bransford veronderstelt dat onze sociale reacties en vooroordelen de herinnering aan andere personen kan doen afbuigen, zodat we, als we vandaag iets slechts over hen horen, ons geheugen vaak op de nieuwe informatie afstemmen en aldus deze nieuwe mening versterken en uiterst immuun voor verandering maken.

Waarom is het geheugen zo wezenlijk persoonlijk, zo eigenzinnig in zijn manieren om informatie te ordenen, zo gevoelig voor samenhang en betekenis? Waarom is het zo verweven met andere geestelijke activiteiten en zo lastig te ontwarren? Zelfs emotionele gemoedstoestanden en stemmingen lijken het geheugen te beïnvloeden. Een bijzondere geestesgesteldheid - intens

geluk of verdriet, een lichte bedwelming, gebrek aan slaap - kan dienen als een speciale geheugencontext, zodat als iemand in een dergelijke geestegesteldheid met informatie wordt geconfronteerd, de kans groot is dat hij zich deze zal herinneren als hij in dezelfde toestand terugkeert. Als iemand dus dronken was bij het vernemen van informatie, zal hij zich die gemakkelijker herinneren als hij weer dronken is.

Het geheugen is niet autonoom, zoals sommige taalkundigen van syntaxis denken. Was het maar zo eenvoudig. Het geheugen lijkt juist niet eenvoudiger dan taal te zijn, die ook aan het vangnet van een allesomvattende theorie wist te ontkomen. Het slaat informatie niet feilloos op om deze dan vlekkeloos te reproduceren door de informatie volgens een uniforme, zeer stringente verzameling regels te ordenen.

Op het eerste gezicht lijkt het ongelooflijk ondoelmatig dat de evolutie niet een autonoom mechanisme heeft ontwikkeld dat niet door context, toepassing of persoonlijke belang wordt beïnvloed. Bij nadere beschouwing blijkt een dergelijk type geheugen alleen oppervlakkige voordelen te bieden. De mens is niet geschikt om uniform te functioneren. Het succes van de menselijke soort is ten dele te danken aan het ontbreken van specialisatie. In mechanische nauwkeurigheid zijn we niet op ons best en bovendien willen we, in het algemeen gesproken, daar ook niet op ons best zijn. De hersenen zijn geen instrument om alleen maar informatie in een eendimensionale, lineaire gedaante te verwerken. De hersenen zijn geen computer die slechts weinig ruis in de vorm van elektrische interferentie te verwerken krijgt en die werkt door met hoge snelheid een lange serie van eenvoudige handelingen uit te voeren, maar zij zijn zowel blootgesteld aan veel ruis als traag en ze gebruiken een kolossaal aantal componenten om tegelijkertijd informatie langs een groot aantal verschillende kanalen door te geven. De hersenen zijn eerder onzeker dan beslist in hun handelingen en ontmoeten veel antwoorden waarvan sommige juist zijn dan andere en die voortdurend worden aangepast door de feedback van nieuwe informatie.

In tegenstelling tot de delen van een computer zijn zenuwcellen niet zo individualistisch. Geen twee cellen zijn precies gelijk en evenmin reageren ze op dezelfde manier op de binnenkomende informatie. Het systeem is buitengewoon redundant en toch ook bijzonder verschillend. Dat stelt het brein in staat de wereld onder zijn eigen voorwaarden en voor zijn eigen doelstellingen te doorgronden. Het slaat alledaagse kennis op, maar evenzeer kennis van een hoogst eigenzinnige soort. Als mensen de wereld verkennen, gebruiken zij hun hersenen op nagenoeg dezelfde wijze, maar zij moeten ook een zeer persoonlijke relatie met bepaalde delen van die wereld vestigen. Om die reden moet het geheugen gedeeltelijk zeer persoonlijk zijn.

James Jenkins gelooft dat we ervaringen onthouden die een persoonlijke betekenis voor ons hebben, zelfs als die betekenis een zuiver bedenkfel is:

Ik denk dat we uiteindelijk moeten concluderen dat de geest onthoudt wat de geest doet, niet wat de wereld doet. Dat wil zeggen dat ervaring het werk van de geest is en geen treffen tussen de wereld en een passief organisme - en dat ervaring datgene is wat zal worden onthouden.

De hersenen construeren en reconstrueren dus de informatie, creëren een hoogst persoonlijk geestelijk produkt en noemen dat geheugen. Als de mens het best onthoudt wanneer hij de informatie op zijn eigen manier verrijkt en het slechtst wanneer hij de ervaring vereenvoudigt en van haar betekenis ontdoet, moet elke herinnering voor elk individu bijzonder en zelfs uniek zijn.

Het geheugen lijkt te zijn ingesnoerd door een structuur, een 'syntaxis', misschien op een heel laag niveau, maar het is vrij om op een hoger niveau variabel, afwijkend en zelfs labiel te zijn. Ondubbelzinnige regels besturen zijn basismechanisme, maar bij daadwerkelijk gebruik is het geheugen minder verkrampt en onvoorspelbaarder. De psycholoog Robert Verbrugge vergelijkt het geheugen met de bewegingen van een paard dat door het vrije veld galopeert. Het paard coördineert zijn ledematen in een zeer regelmatige en ritmische beweging en deze coördinatie blijkt in een elementair deel van zijn ruggegraat tot stand te worden gebracht. Maar als het paard op zijn weg een rotsblok of een heg ontmoet, vertoont zijn bewegingssysteem een geweldig aanpassingsvermogen door de basisregelmaat van zijn galop af te stemmen op de onvoorspelbare oneffenheden van het terrein. Handelingen van lichaam en geest hebben behoorlijk wat onderliggende syntaxis, waarvan de grondregels algemeen van toepassing zijn. Maar deze handelingen mogen aan de *oppervlakte* ook minder regelmatig zijn: daar moeten universele principes worden gesteld om te worden toegepast op bijzondere voorwaarden, concrete voorvallen en unieke omstandigheden.

Alles wat in de hersenen als herinnering wordt vastgehouden, is abstract. Om tot uitdrukking te worden gebracht, moet de herinnering worden omgezet in een andere code en in een structuur die dichter bij het bewustzijn ligt. Daarom neigt de nauwkeurige, concrete uiting van het geheugen bij ongeacht welke gelegenheid naar veranderlijkheid, of het nu om taal of om fietsen gaat. We beschikken over een mechanisme om grammaticaal perfecte zinnen te produceren, maar de zinnen die we in werkelijkheid uitspreken zijn vaak allesbehalve perfect: dit is het onderscheid dat Chomsky maakt tussen competence en performance. De basisrestricties zijn regelmatig, maar de oppervlakte-details zijn buitengewoon ongelijk. Op dezelfde manier heeft het geheugen een grote flexibiliteit, maar ten koste van een prijs. Het betekent tevens dat we waarschijnlijk onjuist onthouden.

Evenals het informatiesysteem van een taal kan het geheugen gedeeltelijk, maar dan ook slechts gedeeltelijk, worden verklaard aan de hand van de abstracte regels die eraan ten grondslag liggen. De regels verschaffen een basiscompetence, maar ze bepalen de performance niet volledig. De overgang van structurele abstracties naar rijke geestesprodukten bij confrontaties tussen geest en wereld is nooit eenvoudig, zelden rechtstreeks en weerspiegelt altijd

het unieke van een gebeurtenis, de rijkdom aan context en betekenis en de eigenaardigheden van de menselijke psyche in actie, omdat we, in voor- en tegenspoed, nu eenmaal zo zijn.

19. INFORMATIE VIA DROMEN

Een uniek vermogen van de hersenen om patronen te vormen uit schijnbaar patroonloze gegevens is misschien niet beperkt tot het wakende bestaan. Het zoeken naar structuur gaat zelfs in de slaap door. Tijdens de droom werken de antioevalskrachten, het nimmer sluitende nachtelijke theater-in-de-hersenen.

Op het eerste gezicht kunnen dromen zeer willekeurig, entropisch en niet-beheersbaar lijken. Maar naarmate ze door moderne psychologen dieper en breder worden onderzocht, vertonen dromen een verborgen vorm, een verwantschap tussen de ene droomervaring en de andere, zodat onder de schijnbare chaos regelmaat en systeem kunnen worden gevonden.

Eigenlijk vertoont het dromen enkele karakteristieken van een theorieënvormende constructie die bekende feiten in een context plaatst, ze in een samenhangend patroon zet en de entropie verlaagt. Maar een theorie doet meer. Ze brengt nieuwe feiten voort die niet bekend waren toen de theorie werd geformuleerd en deze maken ook deel uit van het patroon. Een theorie is een ordenend proces en de orde koppelt niet alleen het bekende aan het bekende, maar ook het onbekende aan het bekende. Zo werkt de universele grammatica bij het systematiseren van de taalregels, die niet uit ervaring ontstaan zijn, maar door de theorie zijn gemaakt. Ook het geheugen probeert orde te scheppen uit wanorde (althoewel dat idiosyncratisch gebeurt) en een samenhangende betekenis te construeren uit wat de geest ervaart.

Het oude idee van de dromen als vermomde verdringingen die beslag leggen op de, tot het letterlijke geneigde, passieve hersenen strookt niet goed met hedendaags denken. Het is natuurlijker ze te zien als gebeurtenissen, 'boodschappen', voortgebracht door de hersenen als deel van hun gewone bezigheden.

C. G. Jung had een buitengewoon brede kennis en een extra zintuig voor de veelzijdigheid van het geestelijke leven en voor zijn strijd om de verschillende lagen van het bestaan te verenigen. Hij stelde dat dromen niet simpel oude voorstellingen zijn, opgeworpen door het geheugen, maar nieuwe informatie, die nooit eerder de grenzen van het bewustzijn heeft bereikt. Hij schreef dat 'elke droom een instrument van informatie en beheersing is'. Voor Jung is het onbewuste geen archief met het verleden van het individu, maar een actieve ideeënbron voor de toekomst. Droomsymbolen, zo schrijft hij,

zijn de wezenlijke boodschappers van de instinctieve naar de rationele delen van de menselijke geest en hun duiding verrijkt de armoede van het bewustzijn, waardoor dit de vergeten taal van de instincten opnieuw leert begrijpen.

In tegenstelling tot Freud was Jung niet van mening dat de droom een masker is van een reeds bekende betekenis, maar dat deze slinks wordt onttrokken aan

de bewuste geest. Volgens hem was de droom communicatief, waarin ideeën weliswaar niet altijd rechtstreeks werden geuit, maar op de beste manier die mogelijk is binnen de grenzen van het medium. In Jungs psychologie is het dromen een constructief proces.

Hieruit volgt dat als de droom een boodschap is, dus informatie en geen ruis, ze een of andere nuttige functie moet vervullen. Informatie is per definitie iets nieuws, iets dat bijdraagt aan de kennis die al in de geest van de ontvanger aanwezig is. Dit is ook Jungs conclusie. Na zo'n 80 000 dromen te hebben bestudeerd kwam hij tot de overtuiging dat ze alle in meer of mindere mate relevant zijn voor het leven van de dromer. Ze passen binnen het psychische schema als geheel.

Jung stelde dat de een bepaalde centrale bron in onze psyche droombeelden uitvindt en ordent. Hij noemde dit centrum het 'zelf'. De functie van het zelf is het geheel van het psychische leven te loodsen en te integreren, het bewuste en het onbewuste, en het medium waardoor dit proces van loodsen en integreren wordt gerealiseerd is het dromen. Dit gebeurt natuurlijk niet allemaal ineens, in een of enkele dromen. Het zelf werkt traag, door middel van talrijke dromen, die weken tot maanden in beslag nemen. Afzonderlijk beschouwd kunnen de dromen van een persoon onzinnig lijken of grillig. Maar als ze worden opgevat als één verspreide reeks, gaan ze in een patroon vallen. Ze onthullen structuur. Het patroon is niet glad en regelmatig, maar vol horten en stoten en het bevat thema's die verschijnen, verdwijnen en opnieuw verschijnen.

De droom is doorgaans geen logische, ethische, laat staan een aangename ervaring. Veel van wat erin gebeurt schijnt ongerijmd en zelfs zonder betekenis te zijn. Dromen getuigen vaak van een slechte smaak. Zo gehoorzamen ze geen goed gedefinieerde wetten. Maar op den duur, zo beweerde Jung, dragen de dromen informatie over die ertoe neigt de onevenwichtige staat waarin de bewuste geest van de dromer zich bevindt in evenwicht te brengen. Als een dromer te zeer wordt geabsorbeerd door zijn werk kan een droom hem herinneren aan zijn behoefte zich open te stellen voor een bredere scala van ervaringen. Als hij een evenwichtig en harmonieus psychisch leven leidt kan een droom bestaande tendenzen weerspiegelen en versterken, maar ze zal altijd haar eigen onafhankelijkheid behouden. Afzonderlijk beschouwd kan een droom willekeurig lijken en zonder verband. Als geheel schikken de dromen zich echter in een soort plan:

Ze schijnen samen te hangen en in de diepste betekenis ondergeschikt te zijn aan een gemeenschappelijk doel, zodat een lange reeks van dromen niet langer verschijnt als een zinloos snoer onsamenhangende en op zichzelf staande gebeurtenissen, maar lijkt op de successieve stappen in een gepland en ordelijk ontwikkelingsproces.

De dromen dragen informatie over door middel van symbolische voorstellingen met een grotere keur van mogelijke betekenissen dan door de prozaïsche realiteit uitgedrukt kan worden. Ze staan in een bredere context van kennis en

ervaring. Om een droom te begrijpen moet de dromer haar vanuit elk oogpunt onderzoeken, dacht Jung, zoals bij het observeren van de materiële wereld een waarnemer een hem onbekend voorwerp in zijn handen neemt en het steeds weer omkeert, waardoor het alle details van zijn structuur onthult. Soms spreekt Jung zelfs bijna over de dromen op de manier waarop moderne psychologen praten over de handeling van het waarnemen, waarin de waarnemer 'in de pas loopt' met de informatie om hem heen en daarvan de betekenisdragende aspecten opvangt. Jung houdt vol dat de informatie in een droom niet los van de dromer kan worden geïnterpreteerd - een inzicht dat hij toeschrijft aan Freud - of op te grote afstand ervan. Hij had de gewoonte het droombeeld 'rondom langs te gaan', in plaats van de associatiewegen te verkennen die willekeurig van haar wegleiden, en altijd beschouwde hij de droom als de kern van zijn onderzoek. De dromer is onverbrekelijk verbonden met zijn droom, die voor hem even normaal en natuurlijk is als de informatieprocessen van zijn eigen genen.

Allan Hobson en Robert McCarley, psychologen van Harvard University die gedetailleerde kritiek hebben geleverd op Freuds stoommachinemodel van de hersenen, verwijzen naar de hersenen als een generator van droomtoestanden. In deze visie genereren de actieve hersenen ten behoeve van dromen hun eigen informatie in reusachtige zenuwcellen in een belangrijk gebied van de hersenen, de pons. Ze beweren dat deze informatie deels willekeurig, deels specifiek is. Beide psychologen vechten Freuds hypothese aan die deze eeuw vrijwel algemeen werd aanvaard en die stelt dat de dromen gecensureerde versies zijn van onbewuste verlangens die in de slaap worden losgelaten door van de vorige dag overgebleven herinneringen. Freuds verklaring van de biologische, en bijgevolg evolutionaire functie van de dromen is dat, aangezien deze verlangens onaanvaardbaar zijn voor de slaper en het bewuste dreigen te verstoren, ze door de hersenen worden verdraaid en teruggebracht in de schijnbaar idiote episodes van een reeks dromen. De reden dat de dromer doorgaans zijn dromen vergeet is dat ze vernomde verdringingen zijn. Freud was ook van mening dat het neven doel van de dromen is de slaap te beschermen tegen de lastige onderbrekingen van het onbewuste, meer nog dan de hoofdrol te spelen in de vorming van het bewuste leven van het individu. Dit vloeide logisch voort uit zijn onjuiste interpretatie dat de hersenen een energie-genererend instrument zijn, dat nerveuze energie vergaart die wordt opgepot of ontladen. Freud zag dromen als veiligheidskleppen die storende stoom ontladden. Ze waren volkomen egoïstisch. Dat moesten ze ook wel zijn omdat de slaap zelf narcistisch was en het egocentrische bestaan van een embryo in het moederlichaam deed herleven.

Hobson en McCarley ontkennen niet dat er een soort defensieve verdraaiing van droomboodschappen kan voorkomen, maar zij verwerpen het voorstel dat zulke transformaties voorop staan bij de vorming van de formele inhoud van

dromen. Volgens hen komen dromen op vanuit fysiologische basisprocessen, niet vanuit vermomde verlangens. Wanneer een slaper droomt, maken zijn ogen onder de gesloten oogleden snelle bewegingen, op en neer en heen en weer. Reusachtige zenuwcellen in een deel van de hersenstam, de pons, zijn veertig keer actiever gedurende dromen dan in de waaktoestand. Men denkt dat zij die snelle oogbewegingen initiëren en ook de speciale patronen van de hersenactiviteiten veroorzaken die ermee worden geassocieerd.

Hobson en McCarley stellen zich voor dat deze reusachtige cellen de droombeelden op twee manieren losmaken. De ene manier is door het rechtstreekse, interne activeren van de visuele centra van de hersenen, zonder welke externe prikkel dan ook. De andere manier is door de snelle oogbewegingen. Wanneer we wakker zijn, worden de oogbewegingen gereguleerd door hersencentra die hoger zijn ontwikkeld dan de betreffende primitieve pons. Wanneer het oog het commando krijgt te bewegen, worden boodschappen over die beweging naar andere delen van de hersenen gestuurd, die overgaan tot het corrigeren en structureren van onze waarnemingen, zodat we bijvoorbeeld de wereld waarnemen als stilstaand, ook al trillen onze ogen. In een slaap met dromen sturen cellen in de pons specifieke informatie over de oogbewegingen naar de hogere centra van de hersenen. Maar die informatie kan pure onzin zijn voor hersensystemen die onder normale, wakende omstandigheden de oogbewegingen initiëren. De hersenen zouden dan moeten proberen een redelijk verhaal te maken van onsamenhangende gegevens.

Hobson en McCarley denken dat dit een aannemelijke hypothese is, hoewel ze niet willen beweren dat het de laatste en volledige verklaring is van de gebeurtenissen tijdens het dromen. De hersenen weten zich zo goed mogelijk te redden door de informatie van de oogbewegingen te vergelijken met de in het geheugen opgeslagen informatie. Ze halen als het ware plaatjes uit kaartenbakken te voorschijn en proberen de curieuze gegevens, afkomstig van een paar ogen die wild in het donker van punt tot punt springen in te passen. 'Wat we willen zeggen,' zo verklaren beide psychologen, 'is dat de ongerijmdheden van de dromen zouden kunnen worden 'vertaald' met het falen van het zenuwstelsel om zijn eigen informatie volledig en logisch te integreren.' De bovennatuurlijke afwijkingen in dromen, de snelle scènewisselingen, het grillige gedrag van de tijd, de door elkaar gehusselde scènereeksen, ze kunnen alle voortkomen uit de willekeurige en toch specifieke aard van de signalen die de droomtoestand genereren.

Deze verklaring van de dromen verschilt in fundamentele opzichten van die van Jung. Toch stemmen beide theorieën ook overeen op enkele belangrijke punten. Ze beginnen allebei met de premisse dat het dromen een informatieproces is. Ze verwerpen het idee dat dromen ontworpen zijn om lastige en verstorende boodschappen te censureren door ze door een psychologische versnipperaar te voeren, maar ze bekijken het juist andersom. Volgens Jungs interpretatie zijn dromen nuttige informatie. Ze zijn voor een normale ontwikkeling van centraal belang, omdat ze helpen bij de groei van een geïntegreerde relatie tussen de bewuste geest en de informatie in de onbewuste psyche,

waardoor deze bewust kan worden. Volgens Hobson en McCarley is het ook niet de taak van de hersenen informatie te degraderen in dromen, maar om er zin aan te geven door wanordelijke gegevens die intern worden gegenereerd in grote, intense ontladingen, - die veel verschillende systemen van de hersenen activeren - te ordenen.

Evenmin als de zinnen in Chomsky's taaltheorie, lopen de dromen met hun betekenis te koop. Ze communiceren 'onder een hoek', zodat de oppervlaktevorm van de boodschap vaak tegengesteld is aan de onderliggende boodschap in de dieptestructuur van de droom. Maar het dromen mag dan een proces zijn dat moeilijk correct kan worden geïnterpreteerd, toch heeft het duidelijk een nuttige functie, die het individu goed doet, biologisch, psychologisch, òf beide. De moderne opvatting is niet dat de dromen de slaap beschermen door het degraderen van niet-gewenste informatie. Het is precies andersom. De slaap beschermt het informatieproces van het dromen. De evolutie zorgde ervoor dat droomervaringen intens zijn en niet worden onderbroken.

Tijdens het dromen is het lichaam verdoofd, bevroren in onbeweeglijkheid, door een mechanisme dat de neuronen afsluit die in het ruggemerg de bewegingen beheersen. De boodschappen die de spieren aanzetten tot bewegen worden geblokkeerd, waardoor de dromer zijn dromen onmogelijk in daden kan omzetten. Niet alleen wordt lichaamsbeweging onderdrukt (behalve de snelle oogbewegingen), ook wordt de informatie naar de zintuigen gedempt om samen te vallen met de activiteitsontladingen in de ogen. Kennelijk is het biologisch belangrijker dat de droom ongestoord doorgaat, dan dat de slaper zijn benen kan gebruiken om te vluchten voor gevaar. De mate waarin het lichaam verlamd is, wisselt met de intensiteit van de intern gegenereerde boodschappen en de gradatie waarin informatie van buiten wordt onderdrukt.

De REM-slaap (rapid eye movement-slaap) schijnt noodzakelijk te zijn, de redenen daarvan zijn nog niet helemaal achterhaald. Als een persoon deze slaap een bepaalde nacht niet krijgt, zal hij deze de volgende nacht extra krijgen. Er zijn ook bewijzen dat gedurende de droomslaap de in de afgelopen dag verworven kennis wordt geordend en gestabiliseerd. De REM-slaap neemt toe als een persoon die dag heeft gestudeerd: een onnatuurlijke bekorting van die slaap tast het vermogen aan om het geleerde te onthouden.

De hersenen zijn tijdens het dromen zeker niet passief. In bepaalde opzichten werken ze eens zo hard als in wakende toestand en houden ze de informatie die zijzelf intern hebben gegenereerd uiterst nauwlettend in de gaten. Dit loopt parallel met hypnose, waarin de hersenen ook uiterst actief zijn en scherp aandacht schenken aan wat er gebeurt. De hersenen zijn ontvankelijk voor de orders en de instructies van de hypnotiseur, maar het waarneembare gedrag van de gehypnotiseerde vertelt niet het hele verhaal van zijn geestelijke toestand. Ernest Hilgard, een autoriteit op het gebied van de psychologie van de hypnose, heeft het bestaan voorgesteld van wat hij metaforisch een 'verbod-

gen waarnemer' noemt, die op het intellectuele niveau functioneert maar tijdens de hypnose dat wat hij weet niet deelt met de bewuste geest.

Om deze stelling te illustreren werd een student gehypnotiseerd en werd hem verteld dat hij voor alle geluiden volledig doof zou zijn tot de hypnotiseur hem op de rechterschouder zou tikken. Grote houten blokken werden dicht bij de oren van de student hard tegen elkaar geslagen en een startpistool werd afgeschoten. Hij toonde geen enkele reactie. Toen kreeg hij te horen: 'Misschien is er een deel van je dat mijn stem hoort en de informatie verwerkt. Als dat zo is, zou ik graag zien dat je ten teken je rechterwijsvinger opsteekt.' Onmiddellijk stak de student zijn vinger omhoog. Terwijl hij nog steeds onder hypnose was, vroeg hij de hypnotiseur zijn gehoor te laten terugkomen en hem ook te vertellen wat deze had gedaan waardoor zijn vinger zich had bewogen op een niet-spontane manier. Hij wist dat hij de vinger bewogen had, maar niet waarom. Kennelijk bestond er, op een bepaald niveau van het bewuste, een luisteraar die de stem van de hypnotiseur kon horen en verstaan, terwijl de student, naar alle uiterlijke maatstaven gemeten, voor de hardste geluiden doof was. Uit latere experimenten bleek dat de verborgen waarnemer in vele opzichten superieur was ten aanzien van het bewuste individu binnen welke hij verborgen zat: hij was rijper, realistischer en logischer en *in het bezit van meer informatie*. Eén student merkte op dat hij zijn verbeelding in een hypnotische trance de vrije loop kon laten en kon toegeven aan enkele aangename fantasieën, 'maar ergens weet de verborgen waarnemer wat er werkelijk aan de hand is.'

Dromen zijn chaotisch noch irrelevant. Ze verschaffen nieuwe contexten en verrijken aldus de kennis. Daardoor hebben ze een educatieve functie voor de dromer, want ze leiden hem door een vaag verlicht landschap met raadselachtige beelden, van de kennis die hij heeft naar de kennis die hij in zijn bewuste, wakende leven nog niet heeft.

Dromen gebruiken informatie als een beheersingsmiddel, dat helpt het wakende leven te ordenen, dat stabiliteit verschaft en dat het onevenwichtige in evenwicht brengt. Dit lijkt veel op de functie die sommige geleerden toekennen aan mythen, namelijk ons geestelijke leven op koers te houden, wat bijna de letterlijke definitie is van het woord 'cybernetica'. Op analoge wijze houden codes de boodschappen 'op koers' in de informatietheorie, bewaren ze hun oorspronkelijke structuur, beveiligen ze hun orde tegen de verstorende effecten van willekeur en handhaven de codes de betekenis van de boodschappen, die hun waarde uitmaakt voor zowel zender als ontvanger.

20. HET LINKS EN RECHTS VAN HET WETEN

De menselijke hersenen zijn op een eigenaardige manier ontworpen. Voor het blote, ongeschoolde oog, zijn ze nagenoeg symmetrisch en is elke hemisfeer een duplicaat van de andere. Wat hun functie betreft zijn beide hemisferen echter zeer verschillend. De onderscheidene stijlen van de hersenen om informatie te coderen, hun vele manieren om zin aan de wereld te geven, zitten asymmetrisch links of rechts. In sommige belangrijke opzichten genereert elke hersenhelft kennis volgens een eigen speciale verzameling regels.

Asymmetrie is voor de evolutie niet de veiligste strategie om te kiezen. Ze geeft wel een grotere wendbaarheid: ongelijksoortige functies die in de hersenen ver uit elkaar zijn geplaatst, kunnen complementair samenwerken zonder elkaar voor de voeten te lopen. Dit houdt in dat we twee of meer taken tegelijkertijd kunnen verrichten. Maar een dergelijke strategie is ook riskant, omdat er minder in reservecapaciteit is om taken over te nemen als er iets ernstigs gebeurt. Als bij een volwassene een deel van de linkerhersenen met een specifieke functie, zoals de spraak, beschadigd raakt, bestaat er geen pendant in de rechterhersenhelft om die functie over te nemen.

De mens is niet de enige soort in het dierenrijk met asymmetrische hersenen. Bij de kat, de rat en veel andere diersoorten zijn ongelijkheden gevonden tussen linker- en rechterhersenhelft. Het is echter duidelijk dat de asymmetrie bij de mens verder is uitgesponnen dan bij andere soorten. Dit punt is belangrijk.

Een wezen dat nooit abstract denkt en nooit plannen maakt of zich voorstellingen van de werkelijkheid maakt, is het meest gebaat bij symmetrische hersenen. Als hij in beweging is, op zoek naar een prooi of weggrennend voor jagers, moet een dergelijk wezen op elk moment de exacte toestand van zijn onmiddellijke omgeving kennen. Zuivere waarneming en snelle, precieze actie zijn van het hoogste belang. Het wezen moet net zo handig links- als rechtsom kunnen keren, en met beide ogen en oren net zo zuiver kunnen zien respectievelijk horen, omdat onbekend is waar de prooi of de jager vandaan zal komen.

Bij de mens zijn de hersensystemen die de motoriek besturen, net als bij katten en ratten, bilateraal. Bij het volgen van een spoor, het jagen of vluchten is er heel weinig voorkeur voor links of rechts. Feitelijk ziet het er naar uit dat in de evolutie voor beweeglijke dieren is gekozen, terwijl deze keuze voor sessiele dieren vaak niet nodig is. De larvale stadia van sommige diepzee-dieren zijn, bijvoorbeeld, symmetrisch, omdat ze zich in het water verplaatsen, terwijl bij de volwassen exemplaren, die stil op de oceaanbodem liggen, de symmetrie verbroken is. Voor mensen is het vermogen zich vrij te bewegen een belangrijke functie, maar niet een die ons tot een unieke diersoort bestempelt. Het kenmerk dat de soort *Homo sapiens sapiens* onderscheidt van andere diersoorten is niet behendigheid of snelheid van respons, maar een hoog ontwikkeld vermogen tot abstract denken, redeneren, verbeelding, taal en een

idee van het begrip toekomst. Mensen zijn in mindere mate afhankelijk van hun omgeving dan andere dieren. Zij reageren niet altijd onmiddellijk na een waarneming, wat hun de vrijheid geeft zich bezig te houden met 'onnuttige gedachten', informatie te verwerken zonder deze onmiddellijk te gebruiken, zodat afwijkingen naar links of rechts geen nadeel opleveren. Onze hersenen hebben zich bevrijd van de dwingelandij van het moment.

De fundamentele ongelijkheden in werkwijze van de hersenen zijn ons goed bekend. De ene hemisfeer, doorgaans de linker, kan goed dingen achter elkaar afhandelen. Ze is gespecialiseerd in getallen en analytisch denken en speelt de hoofdrol in de taal. De andere hemisfeer kan beter omspringen met ruimte, vormen en beelden. Ze maakt meervoudige en simultane verbindingen tussen informatie-eenheden, liever dan ze na elkaar te behandelen. Deze rechterzijde neigt meer tot het volgen van een 'neerwaartse' strategie - ze verwerkt informatie als geheel, ze begrijpt haar volledige betekenis - dan een 'opwaartse' benadering, waarin de delen worden gebruikt om het geheel te construeren, wat vaak meer is dan de som van de delen. Wat de taal betreft, denkt de rechterhemisfeer in termen van hele zinnen in plaats van in afzonderlijke woorden en is ze gevoelig voor de manier waarop zinnen in alinea's zijn verdeeld. Het coderingsinstrument voor het herkennen van gezichten is bijvoorbeeld 'rechts' en dat instrument verschilt van de code voor het herkennen van voorwerpen, welke weer in de linkerhelft ligt. We kunnen een huis identificeren als 'dat met het eigenaardige dak', maar gewoonlijk is een gezicht niet 'die man met die kromme neus', maar 'de man die me aan oom Arthur doet denken'. Het gezicht als geheel heeft een betekenis en wordt in een persoonlijke ervaringscontext geplaatst.*

* Wanneer een afbeelding van een gezicht ondersteboven aan mensen wordt getoond, kunnen zij dat gezicht veel moeilijker herkennen dan de afbeelding van een huis. De psycholoog Robert K. Yin zegt daarover:

Objectief gemeten zijn de verschillen tussen het ene gezicht en het andere zeer klein. We coderen die verschillen heel sterk alsof we daarvoor een speciaal instrument hebben. De regels van deze code zijn waarschijnlijk eenvoudiger dan die van de taalcode en niet gelijk aan de regels van de code voor het herkennen van andere objecten. De regels zijn niet aangeboren. Een bepaald mechanisme is daarentegen al bij de geboorte aanwezig en ontwikkelt zich vroeg. Maar er is een stadium, gewoonlijk in de leeftijd tussen zes en acht, dat kinderen niet altijd goed zijn in het herkennen van gezichten. Ze kunnen door een doorzichtige vermomming het spoor helemaal bijster raken. Als een vader een snor laat staan of als de moeder een duikbril opzet om te snorkelen, kan het gezicht dat van een vreemde worden voor een kind van die leeftijd.

Bovendien schijnt de gezichtscode niet op brandstof te lopen. Ze functioneert zelfs als er geen mensen zijn om naar te kijken. Dit verklaart hoe het komt dat we kunnen denken een gezicht in het vuur te zien. De code vertaalt beelden in gezichten, zelfs als het de verkeerde beelden zijn.

Een persoon ervaart informatie vanuit de buitenwereld en de twee hersenhelften gaan die informatie op verschillende manieren bewerken. Dit leidt tot een grote variatie tussen mensen onderling. De ene hemisfeer kan sterker ontwikkeld zijn, of beide helften kunnen op een speciale manier samen aan een bepaalde taak werken. De twee hemisferen zijn niet totaal onafhankelijk, evenmin zijn ze volledig samengesmolten en hun onderlinge spel verandert voortdurend. Elk ogenblik verschuiven de activiteiten in de hersenen van de ene naar de andere zijde, en welke zijde op een gegeven moment actiever is hangt tot op grote hoogte van de persoon zelf af, wie hij is, wat hij weet en hoe gemakkelijk hij de hem aangeboden informatie plaatst in de context van eerdere ervaringen.

Bij normale hersenen staan beide hemisferen niet los van elkaar, maar zijn ze verbonden door een enorme bundel vezels, het corpus callosum, dat meer dan 200 miljoen zenuwcellen bevat. Via deze grote weefselkabel kunnen beide hersenhelften met elkaar communiceren, alhoewel de precieze aard van de communicatie niet bekend is. Bij de geboorte is er hoegenaamd geen informatieverkeer tussen beide hemisferen, omdat het corpus callosum eerst na twee jaar begint te werken en pas op tienjarige leeftijd helemaal is gevormd. Door dit uitstel van de vorming van een volgroeiende verbinding zouden de twee hersenhelften in staat zijn zich onafhankelijk en op een eigen speciale manier vroeg in het leven te ontwikkelen. Zelfs wanneer de band compleet is, is er geen reden aan te nemen dat alle informatie door beide helften wordt gedeeld of dat door de brug die beide helften verbindt de hersenen een volmaakte eenheid gaan vormen.

Het is mogelijk dat er in de hersenen slechts een gedeeltelijke uitwisseling van boodschappen plaatsvindt. Sommige onderzoeken trekken voorzichtig deze conclusie. In een beroemd experiment werd de linkerhersenhelft van een man met een drug, sodium amytal, in slaap gebracht. De man werd gevraagd een theelepeltje met de linkerhand, die wordt beheerst door de rechterhersenhelft, te betasten. Toen later de verdoving was uitgewerkt kon hij het door hem betaste voorwerp niet benoemen en toonde hij zich totaal onwetend. Nadat men hem echter een verzameling voorwerpen had laten zien pikte hij toch het lepeltje eruit door ernaar te wijzen. De herinnering aan het lepeltje zat in de rechterhemisfeer, die nagenoeg zonder taal is. Ze was daar gecodeerd in een vorm die niet kon worden omgezet in de taal van de linker, 'spreekende' hemisfeer, ook al was de informatieschakel tussen de twee hersenhelften van de man intact. Aangenomen werd dat alleen sommige soorten informatie van de ene naar de andere zijde konden oversteken en andere niet. Als dat zo is, kan het bestaan van geheimschriften waarvan de bewuste hersenen geen sleutel hebben helpen bij het antwoord op de vraag waarom het leven van een persoon in bepaalde opzichten een nooit eindigende speurtocht is om zichzelf in alle aspecten en dimensies te leren kennen.

Joseph Bogen heeft een lijst met termen samengesteld; deze wordt gebruikt door psychologen die al vele jaren worstelen met een definitie van de werk-

wijzen van de linker- en de rechterhelft met betrekking tot het weten. Deze lijst is uiterst interessante lectuur voor hen die bekend zijn met de concepten van de informatietheorie. In de door Bogen gebruikte termen om elke hemisfeer te onderscheiden, weerklinken de ideeën die eerder in dit boek al zijn onderzocht. De enigszins verkorte versie van Bogens lijst ziet er als volgt uit:

<i>Linkerhersenhelft</i>	<i>Rechterhersenhelft</i>
Intellect	Intuïtie
Convergent	Divergent
Intellectueel	Sensueel
Deductief	Fantasierijk
Actief	Ontvankelijk
Discreet	Continu
Abstract	Concreet
Realistisch	Impulsief
Propositioneel	Fantasierijk
Transformationeel	Associatief
Rechtlijnig	Niet-rechtlijnig
Historisch	Tijdloos
Uitdrukkelijk	Stilzwijgend
Objectief	Subjectief

Op het gevaar af te generaliseren over conclusies die al te algemeen zijn, zouden we kunnen zeggen dat de linkerkolom meer wijst op de aanwezigheid van beperkingen dan de rechterkolom. Taalkundig is links meer Chomsky-achtig, doordat meer wordt gerefereerd aan wat taalgebruikers niet kunnen dan aan wat ze wel kunnen. Links is er minder onzekerheid en een besef van minder mogelijkheden. De categorieën links geven het idee dat informatie wordt gecodeerd op manieren die strikter georganiseerd zijn, formeler, stabiel en foutloos. Ze refereren aan denkwijzen waarin structuur van groot belang is, maar wel structuur van het soort waarbij de ene component wordt aangepast aan de andere, door een verbinding die geen ruimte laat voor dubbelzinnigheden of meervoudige verbanden. *Convergent* sluit in zich het idee van een betekenis die zich samentrekt tot binnen de grenzen van de welgevormde grammaticale zin, liever dan vele interpretaties te dragen. *Deductief* beschrijft een analytisch soort van redeneren, zinnen waarbij het predikaat al logisch is vervat in het onderwerp: 'Alle vrijgezellen zijn ongetrouwde mensen.' De propositionele taalvorm is er een van de waar/onwaar variant: een verklaring. *Rechtlijnige* gebeurtenissen zijn strakker geordend dan niet-rechtlijnige; hun redundantie is groter. En het is het *uitdrukkelijke* meer toevertrouwd om de werkelijkheid te presenteren dan het stilzwijgende. Komt het dan als een verrassing dat de taal voornamelijk in de linkerhersenhelft zetelt?

Ordesystemen die reeksen vormen waarin bepaalde items op elkaar volgen, zijn typische produkten van de linkerhemisfeer. Zoals de psycholoog Marcel Kinsbourne heeft uiteengezet construeren wij dergelijke reeksen door moge-

lijkheden uit te sluiten. Bij elke stap in de keten wordt er één gekozen uit het geheel van items. Door uitsluiting onttrekken wij 'iets' aan een context. Door insluiting wordt dat 'iets' erin geplaatst.

Van alle hersenactiviteiten is de taal het duidelijkst asymmetrisch gelokaliseerd. De rechterhemisfeer heeft niet zo'n uitgesproken voorkeur voor het taalgebruik als de linker. De enige generalisatie die veel psychologen zichzelf toestaan over het onderwerp asymmetrie is dat bij de meeste mensen de linkerhelft voornamelijk bezig is met de productie van gesproken taal, terwijl de rechterhelft bijna spraakloos is. Het is mogelijk dat het vermogen om radicale veranderingen aan te brengen in de structuur van informatie - haar van de ene code om te zetten in een andere door middel van formele en uitermate beperkte regels - het wezenlijke verschil markeert tussen beide hemisferen. De code van de taal is immers waarschijnlijk de machtigste, de meest complexe en de meest ingewikkelde code in de hersenen. Het instrument dat de interne fonetische structuur van woorden analyseert moet enorm vernuftig zijn.

Hoewel het gesproken woord misschien eenvoudig mag lijken, is het in werkelijkheid geweldig ingewikkeld. De spraakklanken zijn niet als de letters van het alfabet, elk gescheiden en apart. Als dat zo was zouden gesprekken hinderlijk traag en moeizaam zijn. Als iemand bijvoorbeeld het woord 'kop' zegt, zijn de klanken niet netjes opgesplitst in medeklinker, klinker en medeklinker; ze overlappen elkaar op een heel complexe, bij uitstek menselijke manier, want baby's doen dat al als ze brabbelen, in tegenstelling tot apen.

Deze methode om taal te gebruiken door fonetische deeltjes elkaar te laten overlappen, waardoor een hele lettergreep als een vloeiende klank wordt geproduceerd, illustreert treffend het vermogen van de codes om snelle en toch betrouwbare communicaties mogelijk te maken. Het ontwarren van een dergelijke, noodzakelijk ingewikkelde code, in het besef dat de afzonderlijke delen zich in een complexe klank hebben verenigd, vereist een mentaal instrument van een meer abstract en niet-aanschouwelijkmakend type dan die welke bestaan in het niet-verbale gedeelte van de hersenen.

De psycholoog A.M. Liberman denkt dat de linkerhemisfeer dit speciale informatie-coderingsinstrument bezit. Die zijde van de hersenen is daar immers buitengewoon goed in.

Het is bekend dat de rechterhelft van de hersenen de medeklinkers slecht begrijpt en niet goed is in syntax, het speciale terrein van de linkerzijde. Het is nog steeds niet duidelijk in hoeverre dit zonder meer het gevolg is van de afwezigheid van een functie of dat dit een effect is van een onderdrukking van de rechterhersenen door de linkerhersenen via het corpus callosum. Er bestaat echter weinig twijfel dat de rechterzijde de transformationele vaardigheden mist, het vermogen dus om de ene structuur in de andere om te zetten door middel van regels, wat chomskyaanse taalkundigen van centraal belang achten. Zelfs bij patiënten met gespleten hersenen, waar de kans ontbreekt dat de linkerhemisfeer met de rechter in contact komt, toont deze laatste een opmerkelijke begrenzing. Ze kan de betekenis van woordparen als 'zeer' en 'meer' begrijpen en ziet in dat ze verschillen, maar ze kan door het onderscheid

tussen deze woorden niet bevatten dat er ook overeenkomsten zijn: ze weet niet dat de woorden rijmen.

Toch is de rechterhersenhelft geen taalkundig onbenul. Ze heeft haar eigen codes en eigen regels die de moeite van onderzoek waard zijn. Ze heeft enig begrip van taalgebruik en kan goed toonhoogte waarnemen, intonatie, klemtoon, stembuiging, hard en zacht. Ze weet of een zin een vraag stelt, een opdracht geeft, een voorwaarde stelt, of een verklaring aflegt. De rechterhersenhelft kan denkbeeldige 'situaties' construeren, waarin deze verschillende niet-verbale informatie-elementen zouden passen en zinvol zijn. Bij het horen van de klank 'es' zal de linkerhemisfeer domineren als het duidelijk is dat de spreker het heeft over de letter 's'. Maar als de spreker zegt 'ik snoeide een es' zullen de rechterhersenen nauwkeuriger de betekenis van de klank kunnen identificeren.

Er is bewijsmateriaal dat de rechterhersenen, ondanks al hun taalkundige beperkingen, een actieve bondgenoot kunnen zijn bij ingewikkeld taalgebruik. We hebben gezien dat taal te eenvoudig wordt wanneer ze slechts wordt opgevat als structuur en vorm. De betekenis valt samen met de zin, in plaats van uit te waaieren naar bredere contexten. De rechterhemisfeer corrigeert die neiging om betekenis in te dammen. Ze laat de hersenen als geheel minder strikt op het letterlijke letten. Ze speelt waarschijnlijk een rol in het begrijpen van poëzie, waar woorden veel nuances en betekenislagen hebben die verder gaan dan louter verwijzing en woordenboekdefinities. Ze schenkt aandacht aan de betekenis van klank en tempo, niet alleen aan de inhoud van de woorden.

Van de activiteiten van de linkerhemisfeer op zich, zei de psycholoog Howard Gardner dat ze 'lijken op het lezen van een toneelscript in plaats van het stuk zelf te gaan zien.' Meer nog dan alleen te letten waarop ze slaan en waarnaar ze verwijzen, weet de rechterhemisfeer wat de woorden betekenen en in welk verband ze staan. Ze kan het belachelijke en het misplaatste inzien en er zich bewust van zijn dat woorden en zinnen zijn ingebed in een brede matrix van verhoudingen. Van de rechterhemisfeer kan worden gezegd dat ze wereldser is dan de linker.

Gardner is een van het relatief kleine aantal werkers die de activiteiten van de rechterhersenen hebben onderzocht bij hun reacties op taal met meer dan een nauwkeurig bepaalde interpretatie. Samen met Suzanne Hamby is hij het gedrag van de 'kleine' hemisfeer nagegaan wanneer ze verhaaltjes, grapjes en figuurlijk taalgebruik aangeboden krijgt. Zowel gezonde mensen als mensen met een hersenletsel namen aan het onderzoek deel. De resultaten waren zeer verhelderend. Zij bij wie de rechterhersenen waren beschadigd, terwijl de linker werkten, beheersten de zinsbouw en de klanken volkomen. Hun kennis van de feiten in de verhaaltjes en grapjes was voldoende, maar niet zo goed als die bij de gezonde proefpersonen. Ze herinnerden zich stukjes vaak woordelijk, in plaats van die, zoals gebruikelijk is, te parafraseren. Wat het meest opviel bij het beantwoorden van de vragen over de verhaaltjes was dat ze die

steeds bijna letterlijk hadden opgevat: ze waren te serieus over bepaalde gebeurtenissen en konden over het algemeen moeilijk het fictieve rijk van een verhaal betreden zoals dit door het verhaal zelf werd aangegeven.

Een patiënt met beschadigde rechterhersenen weigerde te accepteren dat een klein meisje op een brandweerauto reed. 'Dat mogen alleen mensen die daartoe bevoegd zijn', luidde zijn protest. Een ander had een soortgelijk bezwaar: 'Geen enkel kind zou stiekem in een brandweerwagen gaan zitten; ze kunnen wel de sirene laten loeien van een brandweerkazerne, maar niet op een wagen rijden.' Een derde patiënt, die gevraagd werd een verhaaltje te vertellen dat hem eerder was voorgelezen, liet in zijn weergave het feit weg dat een winkel in een stad in een zijstraat lag. Hij liet dit niet weg omdat hij het was vergeten, maar omdat hij dacht dat het niet juist was. 'Het heeft geen zin om in een achterafstraat te zitten,' wierp hij tegen, 'daarom zei ik het ook niet.'

Deze patiënten, bij wie de rechterhersenen waren beschadigd, wisten niet wat belangrijk was in de verhaaltjes en wat bijkomstig. Het bleek dat zij niet in staat waren toekomstige gebeurtenissen in de vertelling te raden, zelfs niet als deze heel voorspelbaar waren. Terwijl ze soms aannemelijke elementen in een verhaal veranderden, aanvaardden ze vaak zonder meer bizarre details. Ze konden het patroon van verbanden tussen de verhaalkernen niet waarderen en plaatsten zichzelf in de gebeurtenissen bij het navertellen van de plot of bij het beantwoorden van vragen erover. In plaats van een verzonnen verhaal te behandelen als iets met een eigen afzonderlijk bestaan, konden ze die integriteit niet respecteren en sjoemelden ze met details als die niet in de pas liepen met hun opvatting van de waarheid. Ze waren ontvankelijk voor emoties, maar interpreteerden ze fout door bijvoorbeeld te denken dat een persoon in het verhaal bang was, terwijl die toch duidelijk als zijnde bedroefd was beschreven. De patiënten konden echter wel logische argumenten te voorschijn halen voor het idee dat het personage bang was. Zelfs als die argumenten sloegen op het verhaal zelf. Veel commentaar was aannemelijk en zelfs relevant als ze heel beperkt op een enkel voorval sloeg. Alleen wanneer de ruimere contexten en de algemene situering van het verhaal erbij werden genomen, werd het commentaar bizar en stemde het niet overeen met de duidelijke algemene bedoeling van de auteur. De patiënten beheersten zinsbouw en spelling goed, evenals de betekenis van de afzonderlijke woorden en uitdrukkingen, maar ze konden niet goed omgaan met informatie over de context. Ze wisten zich het 'basis-skelet' van een bedachte intrige niet eigen te maken en konden daardoor evenmin uitmaken of een bepaald detail in het licht van het verhaal als geheel paste. Patiënten met een beschadigde rechterhemisfeer leken een

ankerplaats te missen ten opzichte van de buitenwereld: ze waren onzeker over hun eigen positie ten opzichte van de diverse sociale omgevingen of literaire werken en ze konden daarom niet de juiste afstand bewaren. [...] Het is alsof de linkerhemisfeer een zeer efficiënte, maar beperkt geprogrammeerde taalcomputer is. De rechterhemisfeer is het ideale publiek bij een humoristische stomme film, maar alleen samen kunnen beide hemisferen de vier Marx brothers waarderen.

In de schaarse gevallen dat wegens ernstig hersenletsel complete verwijdering van de rechterhelft noodzakelijk is, kan de patiënt nog steeds grammaticaal correct spreken, maar veel gesprekken hebben een opmerkelijk 'onnozel' niveau. Speelse opmerkingen worden ernstig genomen. De taal wordt uiterst direct. Op een vraag als 'Zou u het zout kunnen doorgeven?' antwoordt hij waarschijnlijk 'Ja, ik kan het zout doorgeven.'* Aan een patiënt van dr. George Austin, neuroloog aan de University of Pennsylvania, werd gevraagd een verzameling gewone voorwerpen te identificeren. Hij beschreef een kussen als 'stof of leer om de onregelmatigheden van het lichaam te steunen,' en een speelgoedpoes als 'iets dat bestemd is voor de verkoop'. Aan een andere patiënt vroeg dr. Austin 'Hoe voelt je je?' en de man antwoordde: 'Met me [sic] handen.'

Behalve dat de rechterhersenen aards geörienteerd zijn, het vermogen hebben een gevoel voor het passende uit te dragen, zijn zij ook ontvankelijk voor metaforen. Wanneer deze hemisfeer beschadigd is, ziet men vaak niets vreemds in een belachelijk letterlijke interpretatie van een figuurlijke uitdrukking. Het is alsof men na het lezen van de versregel van Dylan Thomas, 'The dead oak walks for love,' niet verrast zou zijn bij het zien van een eik die de weg afbeent op pad naar een afspraak met een andere eik. Gardner gaf iedere proefpersoon de figuurlijk bedoelde zin 'Een zwaar hart kan werkelijk verschil uitmaken' en daarna twee tekeningen: een van een man die wankelt onder het gewicht van een hartvormig voorwerp, en een van iemand die huilt. Daarna werd gevraagd welke tekening het best paste bij de zin. Een groot deel van de mensen met beschadigde rechterhersenen koos de letterlijke illustratie.

We zouden nu kunnen proberen de lijst van Bogen met typische coderingswijzen van de linker- en rechterhelft te herschrijven in het licht van deze nogal tentatieve ontdekkingen:

<i>Links</i>	<i>Rechts</i>
Letterlijk	Metaforisch
Onnozel	Ontwikkeld
Denotatie	Connotatie
Contrasterend	Vergelijkend
Banaal	Rijk
Opwaarts	Neerwaarts
Verbaal	Non-verbaal
Niet passend	Passend
Uitsluiting	Insluiting

* Het is interessant dat de zin 'Zou u het zout kunnen doorgeven?' in de taalkunde is gebruikt om de bewering te verduidelijken dat dergelijk taalgebruik, hoewel syntactisch strikt correct, niet uitsluitend het produkt is van formele syntactische regels, maar in bredere zin opgelegd wordt door de sociale behoefte een verzoek niet op een bevel te laten lijken: 'Geef het zout door.' De indirecte vorm van de zin heeft niet alleen een taalkundige oorzaak - syntaxis en betekenis - maar ook een pragmatisch-sociale. In de gewone gesprekken zou van niemand verwacht worden dit letterlijk op te vatten.

Als we uit deze lijst snel en op grond van eerste indrukken een conclusie trekken, dan suggereert de rechterkolom informatiestrategieën die aan de context bijdragen. Maar er kan meer dan één soort context zijn. Als ze voorspelbaar is en bekend, is ze redundant. Als ze nieuw is en onverwacht, is ze informatie. In de informatietheorie is de invloed van de context van groot belang. De deelnemers aan Shannons woordspelletjes konden heel goed de volgende letters of woorden in een zin raden wanneer ze eenmaal de eerste letters van de zin wisten. Wat ze wel wisten, vormde de context voor wat ze niet wisten.

Als de context van een boodschap bekend is, verlaagt ze de verrassingswaarde ervan bij ontvangst en verrassing is nagenoeg gelijk aan informatie. Zoals we hebben gezien is de structuur van het Nederlands zodanig dat bijvoorbeeld de letter 'q' altijd wordt gevolgd door de 'u', waardoor de context van de letter q, de letter u, volledig voorspelbaar is en geen informatie toevoegt. Een bepaalde woordvolgorde levert ook een bekende context voor de erop volgende woorden. Shannons spelers hadden maar acht contextletters nodig om de hele zin 'De kamer was niet erg licht' te raden. Een bekende context die redundant is, verhoogt de betrouwbaarheid en maakt een stuk tekst beter, omdat ze de onzekerheid bij de lezer over wat hij kan verwachten, verlaagt. Bij James Joyce komt bijna elk woord als een verrassing aan, omdat er geen bekende context aan voorafgaat. In *Finnegans Wake* moet de lezer context uit zijn eigen kennis aandragen, of uit kennis van Joyce-commentaren, om de zinnen te begrijpen. Een deel van deze context zal zijn samengesteld uit mentale concepten.

Er is interessant bewijsmateriaal dat laat zien dat de rechterhemisfeer van de hersenen context levert voor informatie die in de linkerhelft is opgeslagen en dat deze context vaak de vorm heeft van concepten die de schijnbaar chaotische reeksen ideeën of woorden begrijpelijk maken of ordenen. Dit type context kan ertoe bijdragen zinnen te ontrafelen die willekeurig lijken. Een zin als

Ondanks het gevaar reprogrammeerde de woede de bus geklemd

heeft een abstracte grammaticale structuur die regelmatig is. Semantisch lijkt ze echter onzin, pure ruis. Haar entropie is hoog, omdat veel woorden volledig verrassen. Het woord 'geklemd' dat op 'bus' volgt, is zeer onvoorspelbaar. In de betekenis van Shannon draagt het een grote hoeveelheid informatie over. Maar het is geen nuttige informatie, omdat de betekenis regels lijkt te schenden. De woordkeuze lijkt volkomen willekeurig, met zelfstandige naamwoorden en werkwoorden die niet aan elkaar gerelateerd zijn.

Robert Hoffman en zijn collega, Richard Honeck, tonen echter aan dat deze zin betekenisvol kan worden gemaakt door haar in een bekende context te plaatsen. Wij stellen ons een verkeersopstopping voor op een net van snelwegen voor het massavervoer dat bestuurd wordt door een computer. Om die opstopping op te heffen drukt een woedende operator een paar knoppen in op het toetsenbord. De zin die daarvoor semantische wartaal was, krijgt meteen betekenis.

Hoffman en Honeck geloven dat de onbeperkte creativiteit van taal, waarop Chomsky de aandacht heeft gevestigd, niet slechts voortkomt uit het gebruik van syntactische regels (een typische vaardigheid van de linkerhersenen), die steeds maar weer worden losgelaten op een eindig aantal woorden, om zo een onbegrensde verscheidenheid van zinnen te genereren. Ze denken dat creativiteit ook zou kunnen voortvloeien uit het vermogen van de hersenen om concepten te genereren.

Ooit dacht men dat er heel strikte grenzen waren gesteld aan het vermogen van de mens om concepten te formeren. Dat geloof wordt nu niet meer zo streng beleden. Het proces is waarschijnlijk minder ingeperkt dan verwacht zou kunnen worden. Een spreker kan een oneindig aantal semantische relaties in taal produceren. Met andere woorden, hij kan een eindeloze hoeveelheid context opleveren. Zo kan 'onzin' begrijpelijk worden gemaakt, niet enkel door middel van syntactische regels, maar door het gebruik van deductie, kennis van de wereld en het vermogen metaforen te vormen. Chomsky beschouwt 'regelgeleide' vormen van kennis, de soort die nieuwe zinnen voortbrengt door middel van syntactische regels, als uniek bij de mens. Het is een vaardigheid van de linkerhersenen. Anderzijds denkt hij dat wij onze conceptuele kennis met andere dieren delen.

Een ander soort context, aangedragen door de rechterhersenen, komt voort uit hun voortreffelijke beheersing van de metafoor. Een metafoor is een stijl-middel dat verband aanbrengt tussen dingen die ogenschijnlijk niet met elkaar te maken hebben, precies zoals in het concept van de razende verkeersleider verband werd gelegd tussen een programma, een bus en een beklemming. De metafoor synthetiseert afzonderlijke ideeën. Ze maakt toespelingen, koppelt en vergelijkt. Ze omvat en integreert mogelijkheden, terwijl de geordende manier waarop informatie wordt gesystematiseerd, die zo typerend is bij de linkerhersenen, mogelijkheden weer uitsluit. De metafoor zorgt voor verschillen en bindt niet.

De metafoor plaatst niet alleen het bekende in een onbekende context, ze plaatst ook het onbekende in een bekende context. Als een schrijver het heeft over 'een hemel van heet, naakt parelmoer' maakt hij de hemel exotischer door die te verbinden met het parelmoer en het parelmoer minder exotisch door het verband met de hemel die wij elke dag zien.

Leraren gebruiken de metafoor bij het openleggen van een nieuw terrein van kennis voor hun leerlingen, omdat ze een brug slaat tussen de reeds aanwezige en bekende informatie en de nieuwe die ze moeten leren. Kinderen kunnen bijvoorbeeld een grote hoeveelheid nieuwe gegevens vlug in zich opnemen als die een patroon van verbanden, een structuur, vertonen. Robert Verbrugge gebruikte de metafoor bij kinderen die voor het eerst met plantkunde kennis maakten. Hij omschrijft boomstammen als 'rietjes voor dorstige bladen en takken'. Zo geeft hij een nieuwe kijk op de boom als een vorm die water uit de grond zuigt, zoals een kind limonade met een rietje opzuigt, door verband te leggen tussen het onbekende gedrag van de boom en een heel bekende ervaring.

Verbrugge werd aangetrokken tot het onderzoek naar de metafoor nadat hij had opgemerkt dat veel zinnen die Chomsky verwierp als zijnde niet-Engels figuurlijk waren en in essentie metaforen. De grammatica van Chomsky laat wel een zin toe als 'Oprechtheid beangstigt Jan', maar verwierpt een zin als 'Jan beangstigt oprechtheid'. Door de beperkingen van de grammatica kan het woord 'beangstigen' alleen op een persoon slaan. Verbrugge wijst erop dat een schuchter persoon iemand die niet graag wil laten zien dat hij oprecht is in de aanwezigheid van een dominerende persoon die Jan heet, toch wel kan zeggen dat zijn oprechtheid beangstigend wordt. Dit is overdrachtelijk taalgebruik, omdat de spreker een van zijn eigenschappen verpersoonlijkt, maar dat mag nog geen reden zijn om het abnormaal of gekunsteld te vinden. Metaforen duiken voortdurend op in gewone gesprekken. Ze maken een wezenlijk deel uit van het dagelijkse taalgebruik. Ze zijn niet louter versiering, omdat ze vaak een veelvoudige verbinding leggen tussen ideeën en daardoor een grote hoeveelheid complexe informatie in een beknopte formulering overdragen. Metaforen vormen een doeltreffend coderingsinstrument.

Is het aandragen van concepten en contexten dan een speciale functie van de rechterhersenen? Eran Zaidel, psycholoog aan de University of California, denkt van wel. Hij heeft het onderscheid opgemerkt dat wordt gemaakt tussen regelgeleide kennis en conceptuele kennis en kwam tot de slotsom dat de rechterhemisfeer de tweede soort bezit, maar niet de eerste. Hij vermoedt dat de rechterhersenen de nieuwe informatie opnemen en inbedden in een bekende context. Zaidel stelt voor dat de rechterhemisfeer de zetel is van een bijzonder soort intelligentie, 'gekristalliseerde' intelligentie, of kennis die het gevolg is van de ervaring; een soort wereldse wijsheid. Gekristalliseerde intelligentie vermindert niet met de leeftijd, maar ontwikkelt zich met het ouder worden. Zaidel zegt:

Wanneer een vaardigheid of taak nieuw is, is de rechterhemisfeer soms superieur en deze superioriteit verschuift naar de linkerhemisfeer als de vaardigheid wordt ingegraven, meer verworven, bewuster wordt misschien.

De rechter lijkt de helft te zijn die zich specialiseert in het verwerken van nieuwe informatie. Dit is een speculatie, maar het legt wel de resultaten in één enkele generalisatie vast.

Wanneer een persoon een nieuw symbool krijgt voorgelegd en nieuwe associaties tussen visuele symbolen en taalachtige gegevens moet leren, zijn aanvankelijk de rechterhersenen dominant. Maar naarmate hij vertrouwer raakt met het systeem, gaat de actie zich naar de linkerhersenen verplaatsen. Het hoe en waarom is niet duidelijk. Misschien omdat de rechterhemisfeer de context voor de nieuwe informatie levert door middel van haar rijke associatieve netwerk.

De menselijke ervaring is eindeloos rijk omdat de manieren om daartoe te komen eindeloos variabel zijn. De syntactische regels brengen een oneindig aantal nieuwe zinnen voort op basis van een eindig aantal woorden en daarin munten de linkerhersenen uit. Maar betekenis wordt in een overeenkomstige overvloed geproduceerd door een massa concepten, een proces waarin de

rechterhersen en een wezenlijke rol spelen. Er zijn voorbeelden van geschreven stukjes van schizofrene mensen die de twee uitersten van dit spectrum laten zien. Het ene soort bestaat voornamelijk uit mededelingen: het is allemaal heel vormelijk en geordend. Het tweede type is onsamenhangend, maar volgepropt met concrete beelden, suggestieve zelfstandige naamwoorden en persoonlijke ervaringen: boordevol betekenis dus.

De retoricus W. Ross Winterowd gebruikte passages uit de opstellen van schizofrenen om voorbeelden van uitersten in de twee stijlen tegenover elkaar te stellen. Het volgende komt van de linkerhersen en is propositioneel:

De draaijerij om eronderuit te komen en de verkeerd begrepen vervangingen voor die aangevraagde Amerikaanse actie kunnen niets anders opleveren dan de algemene resultaten van een negatief standpunt en de onpraktische resultaten van een misplaat-sing, van een verkeerd doel en een onrechtvaardige positie, het onpraktische nut van niet-noodzakelijke tegenspraak. Voor antwoorden op dit dilemma raadplege men Webster.

En nu volgt er een uit de rechterhersen en, met enige elementen voor deze hemisfeer uit de lijst van dr. Bogen:

Ik hoop gauw thuis te zijn. Ik houd van chocoladetaartjes. Doenuts (sic). Ik wil een paar Doenuts. Ik wil wat stroop, een pot stroop of honing, jam. [...] Spreek de Commissie over mij huis gaan met Pasen mijn vierentwintigste verjaardag. Ik hoop dat thuis alles goed is, hoe gaat het met vader. Hindert niets dat er is hoop, de hemel komt, de tijd heelt alle wonden.

Winterowd voegt daar aan toe dat de opstellen van gezonde studenten 'alleen maar een fractie minder schizoïde' zijn dan deze beide voorbeelden. In het eerste 'is er een schijn van samenhang zonder de substantie van een concrete inhoud; in het andere vloeit de beker der betekenis over'.

In de geïntegreerde hersenen, staan de twee polaire werkwijzen naast elkaar en werken ze in meer of mindere mate samen. De linkerhersen en geven de voorkeur aan een hecht-georganiseerd, geordend patroon van relaties dat mogelijkheden uitsluit, dingen eruit haalt, delen stap voor stap in elkaar zet en ze liever tegenover elkaar stelt dan vergelijkt. De rechterhersen en leveren ook een patroon, maar het lijkt een betekenisvolle te zijn, een netwerk van semantische verbindingen dat een wereldse context vormt waarin de structuren van de linkerhersen en kunnen passen en hun plaats vinden. Het kan laten zien dat de betekenis van informatie niet altijd is wat het lijkt en het kan semantische betekenis ontleen aan semantische ruis.

De rechterhersen en zijn meer conceptueel dan dat ze bewerkingen doen, maar zijn niet gespecialiseerd in chaos. Ze zoeken orde op en leveren dit. Zoals we hebben gezien heeft het geheugen niet alleen een abstracte structuur nodig, een 'syntaxis', maar ook een persoonlijke betekeniscontext waarin het onbekende bekend wordt en het bekende onbekend. Dit alles is volledig

verenigbaar met de fundamentele principes van de theorie van Shannon, die zeggen dat er geen informatie is zonder onzekerheid en geen informatie de moeite waard is zonder redundantie, ongeacht in welke van haar onderscheidene manifestaties die redundantie zou willen verschijnen.

21. DE TWEEDE-THEOREMAMAATSCHAPPIJ

Eenvoudige systemen bevatten per definitie weinig informatie. In de thermodynamica heeft het woord 'entropie' geen betekenis wanneer het slaat op een à twee objecten. Shannons entropie, zijn maat voor de hoeveelheid informatie, heeft een statistische vorm en statistiek behandelt het gedrag van de massa en niet van een individueel geval. De in het tweede theorema van Shannon beschouwde codes staan er borg voor dat de betrouwbaarheid van het boodschappensysteem als geheel hoog is, zelfs als de betrouwbaarheid van de transmissie van individuele symbolen laag zou zijn. Aldus heeft de informatietheorie te maken met een systeem in zijn totaliteit. Ze houdt rekening met mogelijkheden en met een keuze hieruit en hoe vrijer die keuze is, des te groter zal de hoeveelheid informatie zijn. Shannons vergelijking maakt dat duidelijk. De theorie is niet geïnteresseerd in wat er moet gebeuren, omdat informatie het oplossen van onzekerheid is en er kan geen informatie zijn tenzij er eerst onzekerheid bestaat.

In de 'postklassieke' thermodynamica begint de visie aan veld te winnen dat eenvoud niet de meest natuurlijke toestand van materie is. Materie is op het quantumniveau uiteraard uiterst complex en dat neemt nog toe naarmate wetenschappers dieper haar geheime afgronden peilen. Maar op een andere manier geldt dit ook voor de natuurkunde die de natuur behandelt op een schaal die boven die van het atoom uitstijgt. Wanneer een thermodynamisch systeem zich op of bij het punt van evenwicht bevindt, zijn de wetten van de natuurkunde universeel en daarom brengen zij ons ertoe grote uniformiteit in de natuur te verwachten. Gelijkheid en eenvoud zouden dan de kenmerken van de wereld zijn. Er zou geen aanwijzing zijn dat de tijd voorbijgaat. Maar Ilya Prigogine heeft erop gewezen dat dit geen juist beeld van de wereld is. Ze is vol rijke structuren die op interessante manieren veranderen. Ze is innovierend en niet-uniform. Er valt in deze tijd meer over de wereld te zeggen dan ooit in het verleden. En dit verloop van tijd in één richting, meer nog dan de tijdloosheid van de klassieke natuurkunde is, fundamenteel. 'We moeten verder gaan dan de verleiding om het eeuwige als waarheid te definiëren en het tijdelijke als een illusie,' zegt Prigogine. Waar nog bij komt dat onomkeerbare, entropie-producerende processen in de stoffelijke wereld 'een fundamentele, *constructieve* rol spelen'; zij staan aan de bases van belangrijke samenhangende processen die op het biologische niveau heel helder verschijnen.

Zodra een systeem uit evenwicht is, een georganiseerd systeem dat uit veel delen bestaat - een levend organisme is hiervan een karakteristiek voorbeeld - dan laten de eenvoudige wetten van oorzaak en gevolg ons in de steek. Ze zijn te eenvoudig om echt nuttig te zijn. Wanneer de ene biljartbal de andere raakt wordt er energie overgedragen en rollen de ballen langs een te berekenen baan. Maar wanneer een oorzaak een gevolg produceert in een georganiseerd systeem, wordt de zaak heel wat ingewikkelder. De oorzaak produceert geen

actie door contact, zoals in het geval van de biljartballen. Het ontlaaft actie in iets dat niet een eenvoudig voorwerp is, maar een patroon van verhoudingen. De actie is intrinsiek en slechts op een indirecte manier gekoppeld aan de stimulus die haar op gang bracht. De natuurkundige Ernest Hutten schrijft:

...het gedrag van een georganiseerd systeem, de bewegingen van een organisme of de menselijke activiteiten kunnen niet worden verklaard in termen van oorzakelijke energetische transmissie alleen.[...] meer dan de oorzakelijkheid beschrijft de informatie processen in of tussen georganiseerde systemen. Het algemeenste model van een natuurlijk proces waarop een wetenschappelijke verklaring gebaseerd zou kunnen zijn, is niet langer de beweging van een deeltje onder invloed van een kracht, maar de opslag (of organisatie) en de transmissie van informatie in een systeem. Dit is het genetische model.

Het nieuwe vertrekpunt van de moderne informatietheorie hield in dat ze brak met de klassieke ideeën omtrent communicatie. Ze liet het determinisme in de steek en daarmee de eenvoud. De informatietheorie beschouwde een boodschap niet als een afzonderlijk, onafhankelijk object, maar als een deel van een georganiseerd systeem, verbonden met de andere delen, zelfs als die enkel als mogelijkheden aanwezig waren.

Een code is eigenlijk een verzameling statistische regels, een vorm van opgeslagen informatie. Ze beperkt op bijzondere wijze de hoeveelheid keuzevrijheid van de boodschappenbron op bijzondere manieren, namelijk door redundantie in te voeren, wat sommige mogelijkheden in het systeem waarschijnlijk maakt dan andere. Maar de crux van een geslaagde code is het bewaren van een optimale hoeveelheid vrijheid, een brede verscheidenheid van mogelijke boodschappen, overeenkomend met de behoefte boodschappen begrijpelijk te maken en te houden. Shannons tweede theorema verzekert ons dat dit kan.

Een dergelijke code maakt een informatiesysteem er zeker niet eenvoudiger op. Ze vergroot de complexiteit eerder dan dat ze die verkleint, omdat complexiteit niet slechts een kwestie is van het aantal delen in een systeem, maar ook te maken heeft met hun onderlinge verband. Zonder redundantie kan complexiteit niet standhouden, omdat fouten op geen enkele manier onder controle gehouden zouden kunnen worden. Zoals we hebben gezien kan de natuur door het gebruik van de principes van Shannons tweede theorema in het informatiesysteem van de genen de evolutie in staat hebben gesteld de eenvoud in versneld tempo te verlaten. Lila Gatlin denkt dat de gewervelde dieren als eerste wezens overstapten van de 'pre-Shannoncodes' op de tweede-theoremacodes. Zij sprongen over de hindernis die von Neumann zag als de scheidslijn tussen eenvoudiger systemen en die waarin de complexiteit explosief wordt. De gewervelde dieren werden minder eenvoudig, hoewel ze

toch niet naar ingewikkelder en uitdagender omgevingen vertrokken. De sprong over de complexiteitshindernis voerde tot een nieuwe chemische samenstelling en tot nieuwe structuren, niet slechts de lichaamsstructuren, maar ook die van de hersenen. En pas op een bepaald niveau van biologische en neurologische complexiteit, zo veronderstelt Chomsky, kan een kennis-systeem zo buitengewoon ingewikkeld als een mensentaal opkomen.

Von Neumann legde de nadruk op twee van de 'kritieke en paradoxale' karakteristieken van ingewikkelde systemen ten opzichte van eenvoudige. Ten eerste kan zo'n systeem dingen doen die een eenvoudiger type niet kan. Ten tweede is er meer informatie nodig voor de beschrijving van een ingewikkeld systeem, zowel kwalitatief als kwantitatief. Von Neumann stelde dat een volledige beschrijving van een simpele automaat eenvoudiger zou zijn dan de automaat zelf. Aan de andere kant zou een volledige beschrijving van een zeer gecompliceerde automaat ingewikkelder zijn dan het apparaat. In feite zou de automaat haar eigen meest eenvoudige beschrijving zijn.

En juist op dit probleem van een geschikte beschrijving mislukten de oude methoden ter verklaring van de zeer ver uitgewerkte structuren van de natuur en de menselijke kennis en wezen de weg naar nieuwe methoden en radicaal andere benaderingen. Zoals von Neumann verwachtte, heeft de informatietheorie het zoeken naar die methoden gestimuleerd.

In de taalkunde werd een gigantische weelde aan feiten vergaard door de observatie van de oppervlakte van uitingen, maar hoe overmaats deze overvloed van gegevens ook was, een volledige beschrijving van de grammatica van een taal bleek nog steeds niet mogelijk. Integendeel, de overvloed vormde een obstakel voor een volledig begrip. Pas door de komst van Chomsky en zijn opvolgers ontstond er een nieuwe manier om taal te bekijken, een die recht begon te doen aan de complexiteit ervan door de regels te onderzoeken die onder de oppervlakte van een uiting opereren. Als bijvoorbeeld een volledige beschrijving van het Nederlands ooit bereikt zou worden, zou ze niet een catalogus zijn van waarneembare zaken. Integendeel. Ze zou, volgens Chomsky's schema, bevatten: structuurregels voor zinsdelen, die bepalen welke constituenten er in deze taal kunnen zijn en die ook zorgen voor hun fundamentele orde, transformatieregels die de dieptestructuur transformeren in een oppervlaktestructuur en het lexicon, met informatie over de context waarin de woorden in een zin geplaatst worden, de regels die gaan gelden bij bepaalde woorden in bepaalde contexten en de uitzonderingen daarop.

Maar zelfs met deze nieuwe benadering, die volledig inzielt dat de verschijnselen niet alles zeggen, is onze kennis van de taal nog steeds miniem. Er zijn enorme onontdekte gebieden. Het is niet zo ongewoon dat een taalkundige zijn leven lang een enkele constructie bestudeert. Het karakter van de Engelse *gerund* bijvoorbeeld, is nog steeds een volslagen mysterie. Een zin als 'John's smoking bothers me' zit taalkundigen behoorlijk dwars. Aan de oppervlakte lijkt 'John's smoking' een bezittelijk voornaamwoord en een werkwoord te hebben, maar in feite bevat het geen van beide. De dubbelzinnigheid is niet opgelost, ondanks jaren van geduldige inspanning.

Biologen staan evenzeer voor raadsels, ondanks de immense overvloed van goed beschreven feiten waarover ze beschikken. Ze zijn er niet in geslaagd het levende systeem te beschrijven, omdat ze de vele verschillende interne soorten regulatie in het DNA niet begrijpen, de algoritmen die de genen tot uitdrukking brengen. Biologen kennen het alfabet van de genen, maar niet de grammatica; ze kunnen de oppervlakte beschrijven, maar niet de principes eronder. Zolang die principes niet bekend zijn, zal er een biologische, noch een evolutietheorie zijn, in de volle betekenis van het woord. Biologen delen met taalkundigen het gevoel van frustratie over de langzame vooruitgang van hun onderzoeken.

Er bestaat een ander type georganiseerd systeem waarvan de externe beschrijving onhanteerbaar zou zijn en ingewikkelder dan het systeem zelf: de menselijke samenleving. Net als taal wordt een samenleving bestuurd door regels en haar aan de oppervlakte tredende eigenschappen zouden voor begrip van haar interne structuur weleens een misleidende gids kunnen zijn. Ze is van nature complex en blijft dit door haar innerlijke regels en principes.

In een moderne democratische maatschappij worden bepaalde handelwijzen door regels uitgesloten. Er zijn beperkingen gesteld aan de vrijheid van toegestane keuzen die tot vernieuwingen en veranderingen leiden. Het gelijke houdt stand te midden van de veranderingen en verzekert daarmee dat de samenleving 'begrijpelijk' blijft, ondanks de verstrooiende krachten van het toeval die altijd aanwezig zijn in alle georganiseerde systemen, of ze nu natuurlijk dan wel kunstmatig zijn. We zouden dit een 'tweede-theoremamaatschappij' kunnen noemen.

De econoom F. A. Hayek heeft gesteld dat in een vrije gemeenschap orde heerst, zonder dat deze doelbewust hoeft te worden gecreëerd. Zo'n samenleving heeft evenals de taal de eigenschap deels spontaan te zijn, deels niet-uitgevonden. In hun politieke theorie maakten de Grieken onderscheid tussen *kosmos*, een spontane vorm van orde, en *taxis*, een gemaakte orde. In een *taxis* zijn alle regels bekend aan de leden van de gemeenschap, omdat die weloverwogen zijn gecreëerd en vastgelegd. Anderzijds kunnen in een *kosmos* de regels niet expliciet zijn: ze worden vaak niet geheel bewust toegepast. Daarom zijn taalregels zo moeilijk te identificeren en te beschrijven: ze zijn verborgen in de onbewuste geest.

Een schaatser volgt de regels van het schaatsen zonder dat hij die expliciet in woorden kan uitdrukken, zoals een fietser fietst zonder erover te piekeren of hij de regels kent om zijn karretje overeind te houden. Waarschijnlijk zou hij zelfs vallen als hij er goed over ging nadenken. Zo gaat het ook met de leden van een spontane gemeenschap. Ze hoeven niet een lijst van regels samen te stellen of bewust te kennen. Maar, hoewel de personen alle regels die hun gedrag genereren niet zelf kunnen beschrijven, zouden die, als ze expliciet zouden kunnen worden gemaakt, de samenleving beschrijven.

Hayek gelooft dat in het leven, in de geest en in de samenleving structuren een complexiteit hebben die alleen kon ontstaan door middel van spontaan-orderende krachten. Iemand kan *hooguit* de regels kennen die gevolgd worden door een deel van de structuur, maar niet alle delen en nooit alle omstandigheden die elk deel beïnvloeden. Het handelen van de enkeling wordt niet door strikte bevelen van hogerop geleid, maar door regels, als informatie opgeslagen in het systeem. De regels definiëren algemene principes en laten daarbij de details open. Daardoor kan een uiterst ingewikkelde samenleving zichzelf in evenwicht houden. De regels van een kosmos zijn algemeen en abstract en ze kunnen worden opgevolgd door veel verschillende soorten handelingen, al naar gelang de omstandigheden. Het gezag legt geen strenge, nauw omschreven bevelen vast zonder onzekerheid, omdat het geen volmaakte informatie kan hebben over datgene waarop die bevelen zijn gebaseerd. Door algemene regels staat het het individu vrij enig persoonlijk oordeel uit te oefenen: hij maakt gebruik van bijzondere informatie die voor hem toegankelijk is, maar niet voor het gezag.

Er is een interessant, zij het controversieel, onderscheid gemaakt tussen wat de primaire en de secundaire regels van de samenleving heten. Herbert Hart, voormalig hoogleraar Jurisprudentie in Oxford, definieert primaire regels als regels die van ons eisen dat wij handelen of hiervan op een bepaalde wijze afzien, of we dat nu leuk vinden of niet. Dit zijn dwingende regels en er wordt strikt de hand aan gehouden. Ze hebben betrekking op het handelingsleven, in het bijzonder op misdrijven. Aan de andere kant zijn er secundaire regels ter verandering van regels. Zij zorgen er bijvoorbeeld voor dat volksvertegenwoordigingen of wetgevende lichamen de primaire regels kunnen modificeren, intrekken of het eens kunnen worden over nieuwe. Secundaire regels verlenen het individu de macht om testamenten of contracten op te maken, eigendom over te dragen, te trouwen of te scheiden. Door middel van dergelijke regels genereert het individu zijn eigen rechten en plichten, in plaats van simpelweg te gehoorzamen aan een verzameling duurzame en dwingende wetten. Hij handelt naar eigen bijzondere omstandigheden en informatie.

Primaire regels bepalen in hoge mate het gedrag en leiden tot een statistische of in verval rakende samenleving die niet in staat is zich aan te passen aan zich wijzigende omstandigheden of aan nieuwe informatie, tenzij men de wetten aan zijn laars lapt of trotseert. Anderzijds vermijdt een geheel van primaire en secundaire regels een dergelijk vastlopen. Dit zorgt voor een dynamische, zich ontwikkelende samenleving.

De samenleving heeft 'opkomende' eigenschappen. Ze ontwikkelt zich op onvoorspelbare manieren. Haar orde is als een kosmos intrinsiek, van binnen-uit voortgebracht. De regels bevriezen haar niet in onbeweeglijkheid, maar ze zijn dynamisch, een bron van vernieuwing en verlenging. Oorzaak en gevolg als model van de menselijke activiteiten zijn ontoereikend omdat de discussie zich verplaatst naar een hoger logisch niveau zodra er wordt gepraat over het verband tussen regels en handelingen die erdoor ontstaan. Het gaat dan niet meer alleen om informatie, maar om 'informatie over informatie'.

Hayek stelt het als volgt:

De mens is evenzeer een regelvolgend als een doelzoekend dier. En hij heeft succes, niet omdat hij weet waarom hij de regels die hij opvolgt zou moeten opvolgen, of omdat hij zelfs maar in staat is die regels te verwoorden, maar omdat zijn denken en handelen worden bestuurd door regels die via een selectieproces geleidelijk ontstaan zijn in de maatschappij waarin hij leeft.[...]

De meeste regels die de menselijke handelingen geleiden, ontstaan omdat het onmogelijk is dat iemand alle ontelbare feitjes waaraan een samenleving zich voortdurend aanpast kan weten, in de zin van een ingenieur die alles kan weten over de werking van een machine. Er zijn noodzakelijke grenzen aan zulke kennis. Een individu hoeft niet alles te weten om bezig te zijn met sterk variërende, zeer complexe activiteiten, evenmin als een bedrijf afhankelijk hoeft te zijn van een mentale superman aan de top van de organisatorische piramide. De leider benut de speciale vaardigheden van de mensen om hem heen, zoals de doorsneeburger vertrouwt op de deskundigheid van buschauffeurs, telefonisten, automonteurs en al die anderen die die werkzaam zijn in beroepen die zijn gebaseerd op geheimzinnige technische geleerdheid waarvan hij nauwelijks benul heeft. Een gezonde zich ontwikkelende samenleving behoeft een zo groot mogelijke verscheidenheid van kennis die constant moet worden gehandhaafd. Eenvormigheid zou fataal zijn omdat dit zou leiden tot enorme redundantie.

Er zijn beperkingen aan de regels die een maatschappij geleiden, maar zij maken uiterst rijke structuren van kennis en handelingen mogelijk. Hayek meent dat 'dank zij de erkenning van de grenzen van het mogelijke de mens altijd zijn vermogens volledig heeft kunnen gebruiken'. Chomsky vermoedde dat dergelijke beperkingen, analoog aan die van de universele grammatica, de mens zouden weerhouden bepaalde typen sociale orde te kiezen en hem ertoe zou bewegen zich andere te verwerven die natuurlijker voor hem zijn. In een vraaggesprek met de Franse taalkundige Mitsou Ronat geeft Chomsky dit idee in grote trekken weer:

Als we erin slagen een plaats te vinden binnen de samenleving is dat misschien omdat deze een structuur heeft die we willen ontleden. Met een beetje voorstellingsvermogen zouden we een kunstmatige samenleving kunnen ontwerpen waarin niemand ooit zijn plaats zou vinden...

Ronat:

Kunnen wij dan het mislukken van kunstmatige talen vergelijken met het mislukken van utopieën?

Chomsky:

Misschien. We kunnen een kunstmatige taal die zodanig in elkaar is gezet dat zij de universele grammatica schendt, niet net zo gemakkelijk als een natuurlijke taal leren door er eenvoudigweg in te worden ondergedompeld. We kunnen ons een dergelijke taal hooguit als een spel indenken.[...] Op dezelfde manier kunnen we ons een

samenleving voorstellen waarin niemand als sociaal wezen zou kunnen overleven, omdat ze niet aansluit bij de biologisch bepaalde voorstellingen en menselijke sociale behoeften. Door historische oorzaken zouden bestaande samenlevingen dergelijke eigenschappen kunnen hebben, wat kan leiden tot diverse ziekten.

Een reden dat kunstmatige talen mislukken als universeel communicatiemiddel, is dat ze juist de complexiteit van het taalvermogen zelf onderschatten. Slechts enkele van die bedachte talen, die men in de zeventiende eeuw begon te ontwerpen, hebben de toets van de tijd doorstaan. Zo'n zevenhonderd schema's van door mensen gemaakte talen zijn in de loop der tijden gelanceerd, waaronder een met snoeren van letters en cijfers, weer een ander systeem is gebaseerd op muzieknoden, en dan is er nog een hele serie twintigste-eeuwse artefacten, alle optimistisch ontworpen als zijnde een omgekeerde toren van Babel. Tot deze vernuftige systemen behoren Idiom Neutral, Novial, Ido, Interlingua, Interglossa, Ro, Occidental en Monling, welke laatste slechts éénlettergrepige woorden gebruikt. Alleen het Esperanto, dat in 1887 opkwam, kende een redelijk succesvolle periode. De andere raakten in onbruik omdat ze de fout maakten ervan uit te gaan dat de menselijke spraak eenvoudig is. Alle liepen op een van de volgende twee punten in de val. De eerdere kunstmatige talen, bedoeld voor gebruik door geleerden, waren te logisch. De latere, ontworpen om vlug door veel mensen te worden geleerd, zoals hun makers vurig hoopten, waren niet complex genoeg in syntaxis en woordgebruik. Daarentegen zijn natuurlijke talen complex en tegelijkertijd niet altijd logisch.

Het is een heel aannemelijk idee dat de structuur van een samenleving, zoals van een taal, althans gedeeltelijk, een weerspiegeling is van de structuur van de menselijke hersenen. Dat zou niet alleen het ingewikkelde van maatschappelijke organisaties verklaren, maar ook het feit dat ze ingewikkeld zijn op manieren die een 'logische' geest verrast zou doen staan. Spontane produkten van de geest (taal, mythen, dromen) hebben een speciale logica en een aparte, eigen structuur die we nog in geen enkel opzicht volledig begrijpen. Aangezien de taalstructuur zodanig is dat de universalia zelden voorspelbaar zijn op basis van logisch redeneren, zal de ontdekking van een van deze universalia verrassend zijn. Hetzelfde zal mogelijk gelden voor samenlevingen als deze vanuit dit perspectief worden bestudeerd.

Als de ideeën van de informatietheorie worden opgevat als iets dat de natuur en de geestelijke activiteiten van de mens minder belangrijk maken, dan worden ze heel fout geïnterpreteerd. Ze wijzen er immers eerder op dat systemen van allerlei typen zich geleidelijk ontwikkelen naar meer complexe toestanden en dat dit de natuurlijke gang van zaken is. We kunnen van de systemen niet verwachten dat ze zich anders gedragen. De informatietheorie, met universele principes die algemeen van toepassing zijn op allerlei soorten

boodschappen, leidt tot het idee van de complexiteit. Ze dwingt ons onze theorieën over evolutie, taal en geest aan te passen, zodat ze minder eenvoudig en minder eenzijdig worden. Willekeur is niet toereikend als verklaring voor de opkomst van hoog-ontwikkelde biologische soorten, noch kan ze dienen als basis voor een bevredigende theorie van de wijze waarop de mens een hoog-ontwikkeld vermogen als de spraak verwerft. Anti-toeval sluipt in het proces op een meer verrijfde en minder intrinsieke manier dan weleens werd aangenomen binnen.

De informatiemachine *par excellence* van ons tijdperk, de computer, heeft het leven niet eenvormiger gemaakt, zoals sociale profeten ooit voorspelden. Het ging juist andersom. De computer bleek een instrument te zijn om verschillen en keuzen te genereren. Ze vergroot de maatschappelijke complexiteit eerder dan dat ze die verkleint. Computers worden ontworpen om verschillende keuzen aan te pakken op grond van het gemak en de snelheid waarmee ze een keuze kunnen maken uit ontelbare alternatieven. De T-Ford werd met succes massaal geproduceerd dank zij de uniformiteit van het produkt. Nu kent elk Amerikaans type auto een grote variatie, een keur van accessoires en alternatieven, extra's, kleuren en materialen, gericht op een markt van eigenaren die een hekel hebben aan uniformiteit. De computer wordt gebruikt om uit de verschillende componenten te selecteren en over de lopende band te verspreiden. Overal waar goederen en diensten worden geleverd, kan de computer worden gebruikt om de individuele keuzemogelijkheid te vergroten. Dit is precies de manier waarop we zouden verwachten dat een informatiemachine werkt.

Het staat vast dat een systeem, van welk type dan ook, erg complex moet zijn wil het de structuur van de geest weerspiegelen. De mens bereikte zijn plaats op een hoge sport van de evolutionaire ladder door zich niet te sterk te specialiseren in bepaalde bewustzijnsvormen, door een riskante veelzijdigheid te verkiezen boven een minder avontuurlijke, veiliger leefwijze met een beperkte keuze. Evenzo heeft een geslaagde samenleving zich niet gespecialiseerd. Ze beschermt de verscheidenheid van talenten, temperamenten en vaardigheden van de leden, zodat ook zichzelf zich op nieuwe en onverwachte manieren kan ontwikkelen en haar complexiteit kan behouden. Ze is voorspelbaar in sommige opzichten en onvoorspelbaar in andere. Ze bevat onzekerheid, zoals alle systemen die oude delen in geheel nieuwe willen reorganiseren.

De informatietheorie leert ons dat een systeem zonder structuur en zonder een code nutteloos is. Het is volmaakt vrij, maar die vrijheid is niet van ruis te onderscheiden. Er is geen begrijpelijkheid en geen bescherming tegen fouten. Het kan niet complex worden. Het systeem is nutteloos, zoals een thermodynamisch systeem in evenwicht. Structuur is *natuurlijk* in de wereld en *natuurlijk* in de mens. Maar als er te veel structuur is, raakt de scheppende impuls beknelde en worden de patronen muf en veranderingsvijandig. Bij te weinig

structuur vallen kunst, literatuur, muziek, mode en politiek terug in wanorde en betekenisloze ruis. Dan heerst de entropie. Structuur en vrijheid zijn, zoals entropie en redundantie, geen elkaar bestrijdende tegenpolen, maar complementaire krachten.

Informatietechnologie is de fysieke belichaming van een abstracte verzameling ideeën. Naarmate de informatie-hardware de zaken van alledag in het moderne leven steeds meer doordringt, raken de ideeën die aan machines ten grondslag liggen beter bekend, dichterbij de gewone ervaringen, en in bredere kring begrepen. In een vrije gemeenschap zijn mensen niet bang voor computers en gaan ze inzien dat de principes waarop computers werken enige opheldering kunnen verschaffen over de werkwijze van de natuur en - zij het elementair en beperkt - over de wijze waarop de geest te werk gaat.

De nieuwe informatiemachines maken ons bewust van verscheidenheid. En daarbij zijn de machines de handelende krachten van verscheidenheid. Ze kunnen een behoefte eraan zowel stimuleren als bevredigen. Als dat ons zou brengen tot een theorie van verscheidenheid, zou dat een heel nieuw sociaal idee zijn. Zo'n theorie zou een manier zijn om te ontsnappen aan de oninteressant geworden alternatieven van het traditionele kapitalisme en het traditionele socialisme, omdat ze een heel andere vraag zou stellen: Hoeveel verscheidenheid willen we in een samenleving en hoeveel beheersing? Het stellen van die vraag brengt een verschuiving teweeg in het centrum van de intellectuele zwaartekracht. De discussie gaat niet langer over deze of gene leerstelling of politieke theologie, maar verplaatst zich naar een ander terrein. In plaats daarvan beschouwt ze de variatiebreedte van mogelijke keuzen die aan de leden van de gemeenschap ten dienste zouden moeten staan. Met deze overweging begint ze. Welke keuzevrijheden moeten worden ingeperkt en welke verbreed? Welke keuzen moeten moeilijk worden gemaakt en welke gemakkelijk? Dit is een tweede-theoremabepijning van het ontwerp van instellingen die keuze hoger plaatst op de sociale agenda, maar erkent dat keuzen beperkt moeten worden en ongelijk gemaakt op manieren die beantwoorden aan de systeemgebonden behoeften van de samenleving, precies zoals redundantie voldoet aan de systeemgebonden eisen van een informatiebron. Dit uitgangspunt verschilt sterk van de simpele leuzen van de twee uitersten in het ideologische spectrum: vrijheid omwille van de vrijheid versus beheersing omwille van de beheersing. Tot het extreme doorgetrokken, loopt het eerste uit op evenwicht of chaos en knevelt het tweede het systeem zo strak dat het zich niet kan bewegen: het kan slechts één boodschap verzenden. In het eerste geval is er te veel verandering en in het tweede te weinig.

De informatietheorie leert ons dat keuze en beperking als partners kunnen samenleven om zo een systeem, of dat nu een levend organisme, een taal of een samenleving is, in staat te stellen niet de pijl van de entropie te volgen, maar die van de geschiedenis, de pijl die het verleden onderscheidt van de toekomst door het eenvoudige, het eenvormige en het willekeurige te verlaten, op weg naar het wezenlijk nieuwe, de eindeloze complexe produkten van natuur en geest.

NAWOORD: ARISTOTELES EN HET DNA

Hoewel de informatietheorie in haar wiskundige vorm erg modern is, behandelt ze ideeën die ver teruggaan in de geschiedenis van het denken. Dit is nauwelijks een verrassing, gezien het feit dat de theorie zelf, de 'informatie' zelf, in het algemeen een natuurprincipe is. Ieder wetenschappelijk systeem waarvan de interessesfeer ook universele concepten omvat als onzekerheid en keuze, structuur en mogelijkheid, orde en wanorde, móet zijn ingebed in een rijke filosofische context.

Wanneer wetenschapsmensen met enig succes een theorie van levende organismen formuleren, hebben ze vaak de neiging Aristoteles met opvallend respect te noemen. Darwins beroemde uitspraak 'Linnaeus en Cuvier zijn mijn beide goden geweest, maar ze waren schooljongens vergeleken bij de oude Aristoteles', wordt tegenwoordig herhaald door de vele molecuulair-biologen, die in de microwereld van de cel speuren naar aanwijzingen voor de mechanismen van een proces dat Darwin alleen in grootschalige termen zag. Ze vestigen de aandacht op de bijna schokkende relevantie van enige van Aristoteles' ideeën voor hun eigen 'revolutionaire' ontdekkingen.

De hernieuwde aandacht van biologen en anderen voor deze antieke bron is terecht. Aristoteles brak immers met de materialistische en mechanistische verklaring van de natuur, ongeveer zoals de moderne natuurkunde de klassieke mechanica van Newton heeft afgelost. Aristoteles definieerde de natuurkunde zeer ruim als de studie der verandering van de dingen die ontstaan en vergaan en die zowel planten en dieren, als aarde, lucht, vuur en water omvatten. In zijn universum leidt verandering tot het wezenlijk nieuwe, niet toevallig, maar omdat de dingen een soort concept of plan hebben dat zij trachten te verwirkelijken, ieder op zijn eigen wijze. Een kuiken vervult het plan dat in het ei besloten ligt, een eik het 'concept' in de eikel. Aristoteles vond dit een bevredigender verklaring van de stoffelijke wereld dan een die aanneemt dat de wereld is samengesteld uit deeltjes die zo willekeurig als biljartballen tegen elkaar opbotsen.

Als we de term enigszins los gebruiken, kunnen we zeggen dat Aristoteles het informatieprincipe in de natuur aan het werk zag: steeds is die natuur bezig is met het specificeren van de vormen die door de materie moet aannemen, waardoor de dingen letterlijk 'geïnformeerd' worden door een idee en naar het ten uitvoer brengen hiervan. De natuur bouwt volgens de gegevens die de materie instrueren op welke bijzondere manier zij moet veranderen. De moderne commentator John Herman Randall stelt het zo:

Het gezichtspunt en de benadering van Aristoteles zijn, zoals we vaak zeggen, biologisch, in plaats van 'alleen maar' mechanistisch. Ze komen voort uit de ervaring van de bioloog die Aristoteles was. Hij kiest biologische voorbeelden, levende processen om het meest volledig en helder natuurlijke processen te ontsluiten. Hij ontleedt het

gedrag van eieren en niet van biljartballen. Het ziet ernaar uit dat hij aan de kippen veel tijd heeft besteed, terwijl de zeventiende-eeuwse grondleggers van de moderne dynamica, zoals Pascal, hun leven lijken te hebben doorgebracht aan de biljart- en goktafel.

De boodschap van Aristoteles is nog steeds verrassend nieuw en uitdagend, zelfs na een tijdsspanne van zo vele eeuwen. In veel opzichten heeft de vooruitgang, niet alleen in de biologie, maar ook in de moderne natuurkunde en logica, het belang van zijn uitspraken niet aangetast, maar juist de diepgang onthuld van Aristoteles' raffinement, en dit op basis van geschriften die niet veel meer zijn dan collegedictaten.

Plato had ook een soort 'informatietheorie', zij het een heel andere. Hij leerde dat er volmaakte, zich niet veranderende vormen bestaan in een eeuwig domein buiten het bereik van de zintuigen, waarmee de voorwerpen in de stoffelijke wereld alleen op een bepaalde manier gelijkenis vertonen. Met andere woorden, vorm bestaat onafhankelijk van substantie, en omdat het idee van een stoel of tafel voortduurt, ongeacht of de individuele stoelen en tafels nu al dan niet ontstaan of worden vernietigd, verandert vorm niet, blijft altijd gelijk. Plato ontkende niet dat er stoffelijke voorwerpen in de wereld van alledag bestaan, maar hij geloofde dat hun bestaan afhing van de vormen, welks ware 'zijn' zij deelden, zij het alleen op een beperkte, onvolmaakte, minderwaardige manier.

Voor Plato was de werkelijkheid van de vormen het voornaamste. Hij stelde de metafysica in het hart van zijn theorie van het zijnde en gaf, door het bestaan van een bovenwereld voor te stellen - een statische, extrinsieke ideaalwereld, waar alles zeker is en voltooid in een tijdloos en transcendentiaal rijk - een antwoord op de eeuwige vraag, die later door Leibniz en Heidegger aldus werd geformuleerd: Waarom is er iets, in plaats van niets?

De 'informatietheorie' van Aristoteles ging een heel andere kant op. Hij weigerde vorm en substantie van elkaar te scheiden. Hij had een meer intrinsieke kijk op het zijnde; hij aanvaardde de werkelijkheid van de vorm of het idee, maar zag deze besloten in de materie, waardoor de dingen in de ervaringswereld los van onze ervaring op zichzelf bestaan en geen schaduwen zijn, geworpen door verheven entiteiten. Evenals Plato nam Aristoteles aan dat de wereldlijke dingen volmaakt noch volledig zijn, maar hij zag de werkelijkheid als een proces waarin de dingen minder onvolmaakt kunnen worden.

Verandering is het wezen van zijn systeem en daarmee ook tijd, beweging en wording. Voor hem is de stoffelijke wereld bovenal dynamisch. Materie is mogelijkheid, de potentie om met het verstrijken van de tijd iets anders en iets verschillends te worden. Verandering is een proces om die potentie te verwerkelijken, om het mogelijke actueel te maken. Dingen, substanties streven er niet naar zo te zijn als hun eeuwige, platonische ideeën. In plaats daarvan

maken ze het impliciete expliciet en het potentiële actueel en dat wordt bereikt door beweging. De vormen bestaan in de natuur, niet daarbuiten, en ze zijn dynamisch en werkelijk. Het 'ideaal' of concept van een huis is er zowel het eindresultaat als de oorzaak van dat het huis er in de eerste plaats is, hoewel het concept niet volledig verwezenlijkt is tot alle stenen en materialen op hun plaats zijn aangebracht. Zo is de vorm van een mens een mogelijkheid die pas is geactualiseerd als die mens volwassen is, maar de vorm bij aanvang is een kracht die het plan naar de voltooiing doet bewegen.

Vorm is een actief principe inherent aan verandering en het speelt mee in het worden van de dingen. Materie is geen dood spul, maar een transformatiemiddel, zonder welke verandering onmogelijk zou zijn. Doordat zij een bepaalde vorm heeft kan materie vrijelijk andere en verschillende vormen aannemen. Wanneer ze zonder vorm is heeft ze onbeperkte mogelijkheden in zich om welke vormsoort dan ook te ontvangen of te worden.

Aristoteles stelde dat vier typen oorzaak verantwoordelijk zijn voor het teweegbrengen van verandering in de wereld.

Oorzaak nummer een is de materie, zonder welke er helemaal niets zou gebeuren.

Oorzaak nummer twee is de vorm die impliciet is in het ding dat verandert. De vorm is zijn betekenis, die bepaalt wat voor soort ding het is, wat 'erover te zeggen valt'.

Oorzaak nummer drie is de directe oorzaak, een actieve bewerker van verandering, een kracht of macht die dat teweegbrengt wat materie alleen maar mogelijk maakt.

Oorzaak nummer vier is het einde of het doel dat een ding van nature bij de verandering neigt te benaderen. Dit is de meest controversiële van alle oorzaaktypen van Aristoteles, omdat het lijkt dat ze impliceert dat de natuur is gericht op een voorbestemd doel, een notie die de wetenschap met afgrijzen beschouwt. Het gezonde verstand zegt echter dat zoiets drastisch helemaal niet geïmpliceerd hoeft te zijn. Aristoteles was van mening dat de dingen zich gedragen op een manier die natuurlijk voor ze is. Zware voorwerpen vallen op de grond en de heel lichte zweven in de lucht. Bepaalde acties leiden tot voorstelbare resultaten. De zon verwarmt de aarde in plaats van haar te bevriezen en dieren gaan hun gang op een duidelijk doelbewuste en doelzoekende manier. Aristoteles vond die vragen heel belangrijk welke in de wetenschap tot nu toe geen hoge prioriteit hebben gekregen. Hij spreekt van mogelijkheden en het actualiseren ervan: "Het einde en doel van al het wordende is de ontwikkeling van potentialiteit naar actualiteit, de belichaming van vorm in materie."

In wezen is informatie een theorie over het actualiseren van het mogelijke. Ze plaatst een werkelijke gebeurtenis in de context van andere verschillende gebeurtenissen die enkel tot stand hadden kunnen komen, waardoor het potentiële en het actuele verbonden zijn. Een verzonden boodschap draagt meer of minder informatie over, afhankelijk van de grootte van het aantal andere boodschappen waaruit ze werd gekozen. Aristoteles sprak van mogelijkheden,

maar hij zag ook het belang in van grenzen die door de vormen aan het aantal mogelijkheden zijn gesteld. De vorm legt de materie beperkingen op, terwijl ze die toch haar potentieel laat verwerkelijken; de vorm laat haar niet de vrijheid om van alles en nog wat te worden.

Wat nog meer verrast is dat Aristoteles wijst op het eigenaardige asymmetrische verband tussen energie en informatie, dat in de moderne wetenschap pas aan het licht kwam toen in de twintigste eeuw de volle implicaties van Maxwells duiveltje werden begrepen. Het duiveltje vereist enorme hoeveelheden informatie over de deeltjes in de donkere ruimte met gas om de entropie ervan zelfs maar een klein beetje te verlagen. Met andere woorden: het is relatief gemakkelijk, hoewel niet kosteloos, om geordende energie om te zetten in informatie, maar het is moeilijk en duur materie in een meer geordende toestand te transformeren door het gebruik van informatie. Aristoteles liet zien dat hij deze ongelijkheid heel algemeen begreep. Hij wijst op de weerstand van materie tegen vorm. Sprekend over de gedachten in het die-renrijk zegt hij:

Een gedrocht hoort natuurlijk tot de klasse van 'dingen tegengesteld aan de natuur', hoewel het niet aan de natuur als geheel tegengesteld is, maar alleen aan de natuur in het algemeen.[...] zelfs bij de verschijnselen die wij beschouwen en waarbij dat wat optreedt bepaald is aan deze bijzondere orde, gebeurt het nooit op een louter willekeurige wijze; en daardoor lijkt het minder wanstaltig, omdat zelfs datgene wat tegengesteld is aan de natuur er op de een of andere wijze mee overeenkomt; altijd wanneer de 'formele' natuur de 'materiële' natuur niet in bedwang heeft gekregen.

Plan, doel en informatie behoorden tot de *actieve* krachten die Aristoteles aan het werk zag in de natuur, die onbegrijpelijk blijft, tenzij deze krachten in beschouwing worden genomen. Dit zijn concepten die de wetenschap pas nu gaat bezien. Tegenwoordig liggen de onontdekte gebieden in de biologie in de cel, waar een gecodeerd model van een biologisch doel (een 'potentiaal' die wacht op actualisatie) de informatie bevat die nodig is voor het specificeren van de substantie van het organisme. Door de vorm van de materie wordt haar doel bereikt en de materie maakt dat de vorm haar plan kan verwezenlijken.

Meer moleculaire biologen wezen op het verband tussen Aristoteles' betekenisconceptie die zich in materie ontvouwt en het huidige concept van het DNA als opgeslagen informatie. B.G. Goodwin, van de University of Sussex, die de genen beschouwt als een bron van biochemische 'hypothesen', getoetst op 'feiten' van de omgeving, merkt op dat Aristoteles' gedachten dezelfde lijnen volgden. Goodwin schrijft:

Aristoteles dacht dat we op grond van de substantie alleen geen conclusies kunnen trekken over de vorm; dat kennis van de samenstelling van iets niet voldoende is om de structuur ervan te bepalen.

We moeten aan de substantie een organisatieprincipe toevoegen, wat voor Aristoteles een vorm was of een idee, immanent in het proces waarbij orde van een karakteristiek type opkomt uit wanorde of een lagere orde, zoals een embryo uit het

ei. Plato beschouwde dergelijke ideeën als transcendentiaal en autonoom, maar voor Aristoteles waren de vormen ook energiebronnen in de materie die streefden naar een volmaakte ordening die het uiteindelijke doel was, het *telos*, van het proces.

Anders dan de Victorianen, die gebukt gingen onder de erfenis en de imposante successen van twee eeuwen Newtoniaanse mechanica, bleef Aristoteles betrekkelijk vrij van de dogma's van zijn tijd. Hij maakte wat fouten, maar had een verrassend helder begrip van datgene wat elke geïnteresseerde in de wezenlijke aard van levende materie zou moeten bestuderen; geen studie van dit orgaan of van die ledematen, maar van het geheel van de vorm, het plan, de *informatie*, die het organisme in de loop der tijden doet ontstaan. Hij zegt:

Een bepaalde kiem laat niet het een of ander toevallig levende wezen ontstaan, en komt zelf evenmin voort uit een toevalswezen, maar elke kiem komt voort uit deze bepaalde ouder die dat bepaalde kroost laat ontstaan. En daarom is de kiem de heersende invloed en de maker van het kroost.

Deze zienswijze leidt vanzelf tot het idee dat de natuur een eenheid is, dat - in de woorden van de moderne biologie - de levenscode universeel is. Aristoteles vond de natuur vol schoonheid in al haar manifestaties, onverschillig hoe grotesk sommige daarvan op het eerste gezicht ook zouden mogen aandoen, omdat er in elke manifestatie een plan ligt en de verwerkelijking van dat plan de wezenlijke schoonheid van het schepsel is.

Max Delbrück, hoogleraar in de biologie aan het California Institute of Technology en Nobelprijswinnaar, stelde in een mengeling van grap en ernst dat, als de commissie voor de Nobelprijs de prijs voor biologie postuum zou kunnen uitreiken, zij dan zou moeten overwegen die aan Aristoteles te geven voor zijn ontdekking van het DNA-principe. Delbrück laat zien dat het Aristoteles opvalt dat het leven zich ontvouwt volgens bepaalde regels en dat hij het een fundamenteel aspect van de natuur vindt. Wat in de moeder wordt geplant is geen miniatuurmannetje, een homunculus, maar een vormprincipe. Hij vervolgt met de vernuftige suggestie dat Aristoteles' leerstelling van de onbewogen beweging, het veranderingsprincipe dat zelf niet verandert, het DNA volmaakt beschrijft, omdat het DNA handelt, vorm in ontwikkeling schept en in dat proces niet verandert.

Interessant genoeg vond de leerstelling van de onbewogen beweging haar oorsprong in Aristoteles' studie van de biologie en werd deze later ingebouwd in zijn natuurkundige theorie. Weer later werd de leerstelling ondergebracht in de astronomie en in de kosmologische theologie. De hedendaagse vijandigheid ten opzichte van Aristoteles komt in Delbrücks visie voort uit driehonderd jaren eerbetoon aan het systeem van Newton; in het bijzonder aan

Newtons tweede bewegingswet die zegt dat er voor elke actie een gelijke en tegengestelde reactie bestaat. Als een lichaam een ander lichaam beïnvloedt en zijn beweging verandert, zal het eerste lichaam een gelijke verandering in tegengestelde richting ondergaan. Met andere woorden, een beweger wordt altijd en overal bewogen door de actie van het bewegen. Elke leerstelling die dit axioma tegensprak werd beschouwd als een verouderde relik van een warhoofdig verleden dat nog niet gezegend was met het licht van de wetenschappelijke rede.

De voorrang die aan de verschillende aspecten van Aristoteles' werken werd gegeven, was gedeeltelijk het gevolg van een grillig verlopen wijze van doorgifte. De geschriften lagen meer dan honderd jaar opgeslagen in een ondergrondse kelder of grot, werden toen overgebracht naar Klein-Azië en gingen vervolgens weer terug naar Athene. Ze werden gekocht en uitgegeven in Rome, waar ze werden gecatalogiseerd en geredigeerd, slechts om verspreid te raken en verloren te gaan na de ineenslorting van Romeinse beschaving. Arabische geleerden bestudeerden en interpreteerden de werken, maar ze bleven tijdens de duistere middeleeuwen in Europa bijna onbekend. Pas nadat er cultureel contact tot stand kwam met Arabische denkers, ten dele als gevolg van de kruistochten, herleefde Aristoteles in Europa. Maar toen werd hij ter hand genomen door theologen en werden zijn ideeën voornamelijk toegepast op religie en logica. Zijn biologische inzichten werden naar de achtergrond verdrongen.

Delbrück stelt dat dit toeval der geschiedenis verantwoordelijk is voor de algehele begripsbarrière die tot aan de dag van vandaag bestaat tussen wetenschapsmensen en theologen: 'Katholieke, protestantse en LSD-mystici, allen in dezelfde mate.'

De eenheid van kennis, die in de geest van Aristoteles zo natuurlijk was, is een doel dat zo nu en dan eerbetoont ontvangt van werkers afkomstig van het hele terrein van wetenschapsbeoefening, maar in de praktijk bestaat ze niet. Wiskundigen en natuurkundigen, biologen en taalkundigen, ze leven allemaal min of meer in een eigen wereldje en spreken aparte talen. Volgens Delbrück houden ze er 'heel verschillende noties van werkelijkheid en waarheid' op na. Als Aristoteles een wijsgeer was die meer dan anderen in staat was de hele natuur en de menselijke aangelegenheden te zien als een onverdeeld proces vol schoonheid, dat bovenal begrijpelijk is voor de mens, kan het dan toeval zijn dat hij ook, uniek onder de klassieke denkers, de man was die bij het eerste glore van een informatietheorie aldaar belandde?

NOTEN
EN
REGISTER

NOTEN

DEEL I - ONTSTAAN VAN EEN INFORMATIETHEORIE

1. De tweede wet en het Gele Gevaar

blz. 16: Shannons artikelen over informatietheorie

Shannon, Claude E., *A Mathematical Theory of Information*, Bell System Technical Journal 27 blz. 379-423, 623-656: 1948

blz. 16, 17: Shannons waarschuwing

Shannon, Claude E., *The Bandwagon*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Transactions on informationtheory IT-2(3) blz. 3: 1956

blz. 18: Bello, Francis, *Great Scientific theories: The Information Theory*, Fortune 48(6) blz. 136-158

blz. 19: 'Een belangrijke hoeveelheid werk [...].'

Robert Fano, in gesprek met de auteur.

blz. 19: Pierce's opmerkingen betreffende Shannon

Pierce, J.R., *The Early Days of Information Theory*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Transac. on Inform. th. IT-19(1) blz. 3-8: 1973

blz. 19: 'Hij kan het artikel vijf jaar [...].'

Moore, Edward, in gesprek met de auteur

blz. 20: 'wiskundig timmerwerk'

Bigelow, Julian, brief aan de auteur, 26 oktober 1981

blz. 21: cybernetica

Door de wetenschap 'cybernetica' te noemen, deed Wiener recht aan het werk van James Clerk Maxwell, die een artikel het licht deed verschijnen over reguleurs (*governors* - vert.) met een soort terugkoppelingsmechanisme (Maxwell, J.C., Proceedings of the Royal Society 16 blz. 270-283: 1868). Het woord *governor* is ontstaan uit een Latijnse verbastering van het Griekse woord voor 'stuurman'. Genoemd in:

Wiener, Norbert, *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Cambridge, Mass. USA, MIT Press: 1948

blz. 21-24: Bijzonderheden over het leven en de aard van Norbert Wiener zijn o.a. ontleend aan:

Wiener, Norbert, *Ex-Prodigy: My Childhood and Youth*, Cambridge, Mass. USA, MIT Press: 1964

Wiener, Norbert, *I Am a Mathematician: The Later Life of a Prodigy*, Cambridge, Mass. USA, MIT Press: 1966

Levinson, N., et al., *Norbert Wiener 1894-1964*, American Mathematical Society Bulletin 72(1) blz. 1-145: 1966

blz. 22: een 'pose'

Levinson, N., *Wiener's Life*, American Mathematical Society Bulletin 72(1) blz. 30: 1966

blz. 39: Hardy's weigering mee te doen aan de Eerste Wereldoorlog

Wiener, Norbert, *Godfrey Harold Hardy*, American Mathematical Society Bulletin 72(1) blz. 72-77: 1949

blz. 24: 'in harmonie leken te zijn met [...].'

Wiener, Norbert, *I Am a Mathematician: The Later Life of a Prodigy*, Cambridge, Mass. USA, MIT Press: 1966

blz. 25: De zicht op de overeenkomsten tussen brownse beweging en communicatie stamt niet van Wiener.

blz. 26: De klassieke communicatie waarvan de ondermijning [...].

In 1928 publiceerde R.V.L. Hartley een artikel (*Transmission of information*, Bell Systems Technical Journal 7 blz. 535-563) waarin communicatie definieerde als een sequentie geselecteerde symbolen, waarbij elke selectie andere symbolen, die hadden kunnen worden gekozen maar die niet gekozen waren, uitsloot. Men kon hopen in het aantal niet gekozen sequenties een maat te vinden voor informatie. Hartley benadrukte de noodzaak van zo'n maat, die slechts op fysieke factoren mocht zijn gebaseerd, waarbij hij voorbijging aan de psychologische vraag hoe de boodschap wordt geïnterpreteerd. Keuze voor elk symbool wordt daarom gezien als volstrekt arbitrair en niet beperkt door de noodzak zinnelijke sequenties uit te zenden, zodat de sequenties even goed hadden kunnen worden gegenereerd door een toevalsinstrument, zoals een roulette. Willekeurige processen in communicatie werden onderzocht door S.O. Rice in 1944 en 1945 (*Mathematical Analysis of Random Noise*, Bell Systems Technical Journal 23 blz. 282-332, idem 24 blz. 46-156). Shannon erkende de waarde van het werk van Hartley en Harry Nyquist ten volle en zei over het Gele Gevaar dat het 'de eerste heldere formulering van communicatie als statistisch probleem' bevatte. Leo Szilard en John von Neumann pasten het informatieconcept toe op fysica voordat Shannons artikelen verschenen. Anderen die belangrijke bijdrage leverden waren onder anderen Karl Pearson en R.A. Fisher in wiskundige statistiek en A.N. Kolmogorov, A.A. Markov en J. Willard Gibbs in wiskundige fysica en waarschijnlijkheid; zij worden dan ook gezien als voorlopers van Shannon.

blz. 27: 'We leidden Wiener rond, [...].'
Poitras, Edward, in gesprek met de auteur.

blz. 27: 'Wiener werd nooit zo onomwonden feitelijk [...].'
Bigelow, Julian, brief aan de auteur, 26 oktober 1981

blz. 28: 'een nieuwe interpretatie van de mens, [...].'
Wiener, Norbert, *I Am a Mathematician: The Later Life of a Prodigy*,
Cambridge, Mass. USA, MIT Press blz. 325: 1966

2. De ruis van warmte

blz. 29: 'niemand weet wat entropie is [...].'
Shannon weet zich niet meer te herinneren dan von Neumann hem dit advies gaf. Myron Tribus staat nog helder voor de geest hoe Shannon hem dit verhaal vertelde tijdens het gesprek dat hij 2 april 1961 in Shannons kantoor op het MIT met hem voerde.

blz. 29: 'Entropie [...] werkt als scharnier tussen materie en geest'
Beauregard, Olivier Costa de, *Epilogue*, in Wallis, Robert (ed.) *Time, Fourth Dimension of the Mind*, Betty B. & Denis B. Montgommery, vert. Harcourt Brace, New York: 1968

blz. 31: Carnot
Carnot, Sadi, *Réflexions sur la puissance motrice du feu sur les machines propres à développer cette puissance*, Parijs: 1824
Vertaling in het Engels door Thurston, R.H., onder redactie van Mendoza, E., *Reflections on the Motive Power of Fire*, Dover, New York: 1960

blz. 33: Boltzmanns afkeer van Schopenauer
McGuinness, Brian (ed.), *Ludwig Boltzmann, Theoretical Physics and Philosophical Problems: Selected Writings*, blz. 185: 1974

blz. 34: 'Slechts de helft van onze ervaringen [...].'
McGuinness, Brian (ed.), *Ludwig Boltzmann, Theoretical Physics and Philosophical Problems: Selected Writings*, blz. 96: 1974

blz. 36: Boltzmann voor de Keizerlijke Academie van Wetenschappen
McGuinness, Brian (ed.), *Ludwig Boltzmann, Theoretical Physics and Philosophical Problems: Selected Writings*, blz. 20: 1974

blz. 36: 'Economen zeggen graag [...].'
Georgescu-Roegen, Nicholas, *Bio-Economic Aspects of Entropy*, in Kubat, Libor, en Zeman, Jirí (eds.) *Entropy and Information in Science and Philosophy*, blz. 131, Elsevier, Amsterdam en New York: 1975

3. De demon onttroond

blz. 39: 'ontbrekende informatie'

Weaver, Warren, in Shannon, Claude E. & Weaver, Warren, *The Mathematical Theory of Communication*, Urbana, Univ. of Illinois blz. 3 (voetnoot): 1949

blz. 43: Over Leo Szilard

Weart, Spencer B., & Weiss-Szilard, Gertrude (eds), *Leo Szilard: His Version of the Facts. Selected Recollections and Correspondence*, Cambridge, Mass. USA, MIT Press: 1978

blz. 44: 'een twintigjarige man die veertig sigaretten rookt [...].'

Lucas, J.R., *The Concept of Probability*, Clarendon Press, Oxford: 1970

blz. 45: 'riekt naar haar menselijke oorsprong [...].'

Williams Bridgeman, Percy, *The Nature of Thermodynamics*, Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass. blz. 3: 1941. Bridgman zei over thermodynamische wetten in het algemeen dat ze, afwijkend van andere natuurkundige wetten, 'iets zeer tastbaar verbaals over zich hebben - meer naar hun menselijke afkomst rieken.'

blz. 45: Henry Adams over Freuds doodsverlangen

Brush, Stephen G., *The Temperature of History: Phases of Science and Culture in the Nineteenth Century*, Bert Franklin, New York: 1978

blz. 45, 46: 'is, dat het de laatste hand legt [...].'

Sayers, Dorothy I., *Have His Carcase*, blz. 236, Avon Books, New York: 1932, 1968

blz. 46: 'Het is het werk van God'

Pierce, J. R., in gesprek met de auteur.

4. Een broeinest van subtiliteiten en vallen

blz. 47: 'Een artikel in *The Encyclopedia of Philosophy* [...].'

Black, Max, *Probability*, in Edwards, Paul (ed.), *The Encyclopedia of Philosophy*, Cromwell Collier & Macmillan blz. 464:1967

blz. 47: 'De hedendaagse wiskunde-auteur James Newman [...].'

Newman, James R., in Newman, James R. (ed.), *The World of Mathematics*, blz. 1448, Simon & Schuster, New York: 1956

blz. 49: over Cardano

Cardano, Gerolamo, *De vita propria liber*.

Vertaling in het Engels door Stoner, Jean, *The Book of my Life*, Dutton, New York: 1930

blz. 51: jainaanse logica

Maistrov, Leonid E., *Probability Theory, A Historical Sketch*, een vertaling in het Engels door Kotz, Samuel, Academic Press, New York: 1974

blz. 51: 'Een van de aantrekkelijkste verklaringen [...].'

Hacking, Ian, *The Emergence of Probability*, Cambridge University Press, New York: 1975

blz. 52: over Paracelsus

Pachter, Henry M., 1951, *Magic into Science: The Story of Paracelsus*, Henry Schuman, New York: 1951

Mises, Richard von, *Probability, Statistics and Truth*, Macmillan, New York: 1939

Mises, Richard von, *Mathematical Theory of Probability and Statistics*, Academic Press, New York: 1964

blz. 54: 'een mate van overtuiging [...].'

Good, I.J., *Kinds of Probability*, Science 129 blz. 443-447: 1959

blz. 55, 56: 'Een waarschijnlijkheidstheorie heeft betrekking op [...].'

Tribus, Myron, in gesprek met de auteur.

blz. 57: visie van Jaynes op waarschijnlijkheid en entropie

Jaynes, Edwin, in gesprek met de auteur.

5. Niet te saai, niet te spannend

blz. 61 e.v.: Shannons woordspelletjes

Shannon, Claude E., *Predictions and Entropy of printed English*, Bell System Technical Journal 30(1) blz. 50-64: 1951.

blz. 63: 'voorbeelden van Black English met verminderde redundantie'

Simon, John, *The Language. Pressure from Below*, Esquire 89(11) blz. 90-91: 1978

blz. 64: von Neumann over redundantie

Neumann, John von, lezing aan de University of Illinois, in Burks, Arthur W. (ed.), *Theory of Self-Reproducing Automata*, Univ. of Illinois Press, Urbana: 1949

blz. 64: 'Het eerste is te saai [...].'

Leibowitz, Fran, *Metropolitan Life*, Dutton, New York: 1978

blz. 64: interview met Isaac Stern

Sweeny, Louise, *Isaac Stern, Concertmaster of the World*, Christian Science Monitor 30 september 1980, blz. 132: 1980

6. Worstelen met willekeur

blz. 66, 67: Shannon over geheime codes

Shannon, Claude E., in gesprek met de auteur.

blz. 69: 'tweede theorema-evolutie [...].'

Gatlin, Lila, L., *Information Theory and the Living System*, blz. 191, Columbia University Press, New York: 1972

DEEL II - DE NATUUR ALS INFORMATIEPROCES

7. Pijlen in alle richtingen

blz. 73: 'De "tijdpijl" is een [...].'

Eddington, Sir Arthur, *The Nature of the Physical World*, Macmillan, Cambridge, England: 1928

blz. 73: Layzers theorie

Layzer, David, *The Arrow of Time*, Scient. American 223(6) blz. 56-69: 1975

blz. 77: 'Naar mijn mening [...].'

Layzer, David, in gesprek met de auteur.

blz. 78: 'In de wereld van De Laplace [...].'

Layzer, David, *The Arrow of Time*, Scientific American 223(6) blz. 56-69: 1975

8. Chemische woorden en chemische daden

blz. 79: 'Aristoteles had gelijk [...].'

Goodwin, B.G., *Biology and Meaning*, in Waddington, C.H. (ed.), *Towards an Theoretical Biology* 4 blz. 269, Aldine Atherton, Chicago: 1972

blz. 84: 'Het vermogen om uitvindingen [...].'

Grassé, Pierre-Paul, *Evolution of Living Organisms*, blz. 3, Academic Press, New York: 1977

blz. 84: 'door de toetsen van een schrijfmachine'

Eden, Murray, *Inadequacies of Neo-Darwinian Evolution as a Scientific Theory*, in Moorhead, Paul S. & Kaplan, Morton M. (eds.), *Mathematical Challenges to the Neo-Darwinian Interpretation of Evolution*, blz. 5-19, Wistar Institute Press, Philadelphia: 1967

9. Over de complexiteitshindernis

blz. 87: 'Talen hebben een inwendige logica [...].'

Lakoff, Robin, in gesprek met de auteur.

blz. 88: 'Dit is volkomen nieuw [...].'

Prigogine, Ilya, aangehaald in Browne, Malcolm, *Scientists see a Loophole in the Fatal Law of Physics*, New York Times 29 mei 1979, blz. C1, C4: 1979

blz. 89: 'leiden tot "ondergang of destructie", hoewel [...].'

Prigogine, Ilya, aangehaald in Thurston, Carol M., *Ilya Prigogine - Towards a Unity of Science and Culture*, Christian Science Monitor 8 oktober 1980, blz. 16: 1980

blz. 89: 'Chomsky neemt aan dat beheersing'

Chomsky, Noam, *Language and Mind*, Harcourt Brace Javanovich, New York: 1972

blz. 89: 'dat in complexiteit toeneemt'

Prigogine, Ilya, aangehaald in Browne, Malcolm, *Scientists see a Loophole in the Fatal Law of Physics*, New York Times 29 mei 1979, blz. C1, C4: 1979

blz. 90: 'het brein van von Neuman [...].'

Axtmann, Robert, *Superredundancy*, brief aan de New York Times, 29 mei 1976. Hierin wordt aangestipt dat het menselijk brein tien maal zoveel neuronen bezit dan het 'nodig' heeft. Axtmann schat dat von Neumanns hersenen tien maal zoveel neuronen omvat als dat van een gemiddeld mens. Hij haalt een gesprek aan met de psycholoog Warren S. McCulloch, waarin McCulloch zich verbaasd toonde dat von Neumann binnen het uur een liter whisky achterover kon slaan om vervolgens in de auto te stappen en met 140 kilometer per uur naar huis te rijden zonder zich dood te rijden. McCulloch berekende dat er tien liter whisky nodig zou zijn om von Neumanns rijvaardigheid aan te tasten, eraan toevoegend: 'ik denk dat Johnny gewoonweg niet zoveel van whisky houdt.'

blz. 90: 'Von Neumann ging ervan uit [...].'

Neumann, John von, lezing University of Illinois, in Burks, Arthur W. (ed.), *Theory of Self-Reproducing Automata*, Univ. of Illinois Press, Urbana: 1949

blz. 92: Ulams spelletjes

Ulam, Stanislas M., *Mathematical Problems with Growth of Figures*, in Burks, Arthur W. (ed.), *Essays on Cellular Automata*, Univ. of Illinois Press, Urbana: 1970

blz. 94: Gödels artikel

Nagl, Ernest, & Newman, James R., *Goedel's Proof*, New York University Press, New York: 1958

blz. 95n: 'het woord "natuur" werd gebruikt in de bijzondere'

Petersen, Aage, *Quantum Physics and the Philosophical Tradition*, Belfer Graduate School of Science, Yeshiva University, New York: 1968

blz. 96: 'Ik voor mij kan [...].'

Elliott, T.S., *The Frontiers of Criticism*, blz. 19: 1956

10. Iets redelijk subtiels

blz. 97: Gatlins werk

Belangrijke werken van Lila L. Gatlin zijn:

Gatlin, Lila L., *Evolutionary Indices*, in *Sixth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, gehouden op het Statistical Laboratory, Univ. of California, juni en juli 1970, april, juni en juli 1971, University of California Press, Berkely: 1971

Gatlin, Lila L., *Comments on Papers by Reichert and Wong*, *Journal of Molecular Evolution* 3 blz. 233-238: 1971

Gatlin, Lila L., *Information Theory and the Living System*, Columbia University Press, New York: 1972

Gatlin, Lila L., *Conservation of Shannons Redundancy for Proteins*, *Journal of Molecular Evolution* 3 blz. 189-208: 1974

blz. 100: 'een biljoen apen tien willekeurige [...].'

Bennett, William R. Jr., *Scientific and Engineering Problem Solving with the Computer*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey: 1976

blz. 104: 'De gewervelde dieren [...].'

Gatlin, Lila L., *Information Theory and the Living System*, Columbia University Press, New York: 1972

blz. 105: 'We kunnen het er niet mee eens zijn [...].'

King, Lester, & Jukes, Thomas, *Non-Darwinian Evolution*, *Science* 164 blz. 788-798: 1969

blz. 106: 'Er lijkt iets redelijk subtiels'

Sanger, Sir Frederick, aangehaald in Sullivan, Walter, *Genetic Decoders*

DEEL III - HET CODEREN VAN TAAL EN HET CODEREN VAN LEVEN

11. Algoritmen en evolutie

blz. 110: 'Met de publikatie van zijn *Syntactic Structures* in 1957 [...].'
Chomsky, Noam, *Syntactic Structures*, Mouton & Co., Den Haag

blz. 110: 'Een voorbeeld uit de logica [...].'
Watanabe, Michael S., *Information-Theoretic Aspects of Inductive and Deductive Inference*, IBM Journal of Research and Development 4(2) blz. 208: 1960

blz. 112: werk van Murray Eden
Eden, Murray, *Inadequacies of Neo-Darwinian Evolution as a Scientific Theory*, in Moorhead, Paul S. & Kaplan, Morton M. (eds.), *Mathematical Challenges to the Neo-Darwinian Interpretation of Evolution*, blz. 5-19, Wistar Institute Press, Philadelphia: 1967

blz. 113: experimenten van Edmund Lin
Lerner, S.A., & Lin, E.C.C., *Evolution of a Catabolic Pathway in Bacteria*, Science 146 blz. 1313-1315: 1964

blz. 114: 'We delen de visie dat [...].'
Britten, Roy, & Davidson, WEric, *Repetitive and Non-repetitive DNA Sequences and a Speculation on the Origins of Evolutionary Novelty*, Quarterly Review of Biology 46(2) blz 111-138: 1971

blz. 114: anagenese
Rensch, Bernhard, *Evolution Above the Species Level*, Columbia Univ. Press, New York: 1960

blz. 115: Goodmans ideeën
De ideeën van Morris Goodman zijn hier nogal kort samengevat. Voor uitgebreidere bestudering worden aanbevolen:
Goodman, Morris, *Molecular Anthropology, Its Approach to Mental Retardation*, Michigan Mental Health Research Bulletin 3(1) blz. 7-16: 1969
Goodman, Morris, Barnabus, John, Matsuda, Genji, & Moore G. William, *Molecular Evolution in the Descent of Man*, Nature 233 blz. 604-613: 1971
Goodman, Morris, & Moore, G.W., *Darwinian Evolution in the Genealogy of Haemoglobin*, Nature 253 blz. 603-608: 1975

Goodman, Morris, Tashian, Richard E., & Tashian, Jeanne H. (eds.), *Molecular Anthropology*, Plenum Publ., New York: 1976
Goodman, Morris, *Molecular Evolution and Natural Selection Affect in the Descent to Man*, Primate News 15(7) blz. 3-7: 1977
Goodman, Morris, *Contrasting Forms of Natural Selection Affecting Biomolecular Evolution in the Descent to Man*, artikel voorgedragen op het symposium te Liblice, Tsjechoslowakije, 5-9 juni 1978

12. Tot de dood gedeeltelijk groen

blz. 117: over gelijkenis DNA van mensen en chimpansees
King, Marie-Claire, & Wilson, Allen, *Evolution at Two Levels in Humans and Chimpanzees*, Science 188 blz. 107-116: 1975

blz. 117: Emile Zuckerhandl
Zuckerhandl, Emile, *Programs of Gene Action in Progressive Evolution*, in Goodman, Morris, Tashian, Richard E., & Tashian, Jeanne H. (eds.), *Molecular Anthropology*, blz. 387-447, Plenum Publ., New York: 1976

blz. 118: 'Roy Britten heeft onze huidige [...].'
Britten, Roy, *The Sources of Variation in Evolution*, in Duncan, Ronald, & Weston-Smith, Miranda (eds.), *The Encyclopedia of Ignorance*, blz. 217, Pocket Books, New York: 1978

blz. 118 e.v.: over neotenie
Voor een gedetailleerd overzicht van het begrip neotenie wordt verwezen naar:
- Gould, Stephen Jay, *Ontogeny and Phylogeny*, Belknap Press, Harvard University Press, Cambridge, Mass.:1977

blz. 119n: over Walter Garstang
Huxley, J., Hardy, A.C., & Fords E. (eds.), *Evolution as a Process*, George Allen and Unwin, Londen: 1954

blz. 121: Huttenlocher over hersenen van zesjarigen
Huttenlocher, Peter, aangehaald in Kleinman, Carol, *Brain is More than Ready for School*, Chigago Tribune 4 september 1979, sectie 2 blz. 1, 8: 1979

blz. 123: 'Spontane innovatie is het stempel [...].'
Brunner, Jerome S., *Nature and Uses of Immaturity*, American Psychologist 27(8) blz. 687-708: 1972

blz. 123: werk van Gardner
Gardner, Howard, & Winner, Ellen, *The Child is Father to the Metaphor*, Psychology Today 12(12) blz. 81-91: 1979

blz. 124: 'altijd in belangrijke mate een [...].'

Fowles, John, *The Magus*, herziene editie, blz. 10, Little & Browne, Boston: 1978

blz. 124: 'Maar als we dat kunnen [...].'

Britten, Roy, *The Sources of Variation in Evolution*, in Duncan, Ronald, & Weston-Smith, Miranda (eds.), *The Encyclopedia of Ignorance*, blz. 217, Pocket Books, New York: 1978

13. Astronauten uit de oudheid overbodig

blz. 125: 'mij overtuigde van de oneindige verhevenheid [...].'

Darwin, Charles, *Autobiography*, bewerkte en geannoteerde uitgave verzorgd door zijn kleindochter Nora Barlow, Norton Library, New York: 1958

blz. 126: 'De paleontologen hebben kennelijk [...].'

Gould, Stephen Jay, *Evolution, Explosion, Not Ascent*, New York Times, 22 januari 1978 blz. 22: 1978

blz. 126 e.v.: genduplicatietheorie

Ohno, Susumu, *Evolution by Gene Duplication*, Springer Verlag, New York: 1970

Ohno, Susumu, *An Argument for the Genetic Simplicity of Man and Other Mammals*, *Journal of Human Evolution* 1 blz. 651-662: 1972

blz. 126: 'Bevatte de DNA-tekst van onze holbewonende [...].'

Ohno, Susumu, *Evolution by Gene Duplication*, blz. 140, Springer Verlag, New York: 1970

Marshack, Alexander, *Cognitive Aspects of Upper Paleolithic Engraving*, *Current Anthropology* 13(3-4) blz. 445-477: 1972

Marshack, Alexander, *Upper Paleolithic Notation and Symbol*, *Science* 178 blz. 817-828: 1972

Marshack, Alexander, *Implications of the Paleolithic Symbolic Evidence for the Origin of Language*, *American Scientist* 64 blz. 136-145: 1976

Marshack, Alexander, *The Meander as a System*, in Ucko, Peter J. (ed.), *Form in Indigenous Art*, Australian Institute of Aboriginal Studies: 1977

Marshack, Alexander, *Upper Paleolithic Symbol Systems of the Russian Plain*, *Current Anthropology* 20(2) blz. 271-311: 1979

blz. 129: Kurtén

Kurtén, Bjørn, *Dance of the Tiger*, Berkley Books, New York: 1981

blz. 130: 'Het is niet langer voldoende [...].'

Gamble, Clive, *Information Exchange in the Paleolithic*, *Nature* 283 blz. 522-523: 1980

blz. 133: 'Een van de onderliggende effecten [...].'

Hawkes, Jacquetta, *The First Great Civilisations: Life in Mesopotamia, the Indus Valley, and Egypt*, blz.7, Knopf, New York: 1973

14. Taalboodschappen: helderheid en ruis

blz. 135: 'werkelijke binnenste kern van het communicatieprobleem [...].'

Weaver, Warren, in Shannon, Claude E. & Weaver, Warren, *The Mathematical Theory of Communication*, Urbana, Univ. of Illinois blz. 3 (voetnoot): 1949

blz. 135-143: Chomsky's ideeën

Chomsky's ontwikkeling kan worden gevolgd in zijn belangrijkste werken:

Chomsky, Noam, *Syntactic Structures*, Mouton & Co., Den Haag: 1957

Chomsky, Noam, *SAspects of the Theory of Syntax*, MIT Press, Cambridge, Mass.: 1965

Chomsky, Noam, *Cartesian Linguistics*, Harper and Row, New York: 1966

Chomsky, Noam, *Language and Mind: Problems of Knowledge and Freedom*, Pantheon Books, New York: 1971

Chomsky, Noam, *Reflections on Language*, Pantheon Books, New York: 1975

Chomsky, Noam, *Essays on Form and Interpretation*, North-Holland, New York: 1977

Chomsky, Noam, *Language and Responsibility*, gebaseerd op gesprekken met Mitsou Ronat (vert. Viertel, John), Pantheon Books, New York: 1979

Chomsky, Noam, *Rules and Representations*, Columbia University Press, New York: 1980

blz. 137: 'John is easy to please'

Chomsky, Noam, *Explanatory Models in Linguistics*, in Nagel, Ernest, Suppes, Patrick, & Tarski, Alfred (eds.), *Logic, Methodology and the Philosophy of Science*, Proceedings of the 1960 Congress blz. 528-550, Stanford University Press, Palo Alto, California: 1962

blz. 138, 139: 'Who do you want to choose'

Chomsky, Noam, *On the Nature of Language*, Annals of the New York Academy of Sciences 280 blz. 46-57: 1976

blz. 142: 'We moeten de universele natuurwetten [...].'

Kant, Immanuel, *Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik, die als Wissenschaft wird auftreten können*: 1783, vert. in het Engels, *Prolegomena to Any Future Metaphysics*, introductie Beck, Lewis White, Bobbs-Merrill, New York: 1950

blz. 142: 'Hoe abstracter de principes [...].'

Chomsky, Noam, *Essays on Form and Interpretation*, North-Holland, New York: 1977

blz. 143: brief van Einstein

Aangehaald in Holton, Gerald, *Thematic Origin of Scientific Thought*, Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass.: 1973

15. Een spiegel van de geest

blz. 145: 'De principes van de transformationele grammatica [...].'

Lakoff, Robert, boekbespreking: Marshall Edelson, *Language and the Interpretation in Psychoanalysis*, Yale University Press, New Haven, in *Language* 54(2): 377-393

blz. 145: 'Een spiegel van de geest [...].'

Chomsky, Noam, *Reflections on Language*, Pantheon Books, New York: 1975

blz. 148: 'Wat nog belangrijker is, waarom [...].'

Rensberger, Boyce, *Recent Studies Spark Revolution in Interpretation of Evolution*, New York Times 4 november 1980 blz. C3:1980

Smith, Neil, & Wilson, Deidre, *Modern Linguistics: The Results of Chomsky's Revolution*, Penguin Books, Harmondsworth, Engeland: 1979

blz. 152: 'Men is gaan inzien [...].'

Jackendorff, Ray, in gesprek met de auteur

blz. 153: 'Het is de theorie, dat wil zeggen [...].'

Heisenberg, Werners, *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*, blz. 63, Harper and Row, New York: 1971

blz. 153: 'De patronen springen eruit.'

Marshall, Megan, *Musical Wunderkinds*, Boston Globe Magazine 26 juni 1981, blz. 28: 1981

blz. 153, 154: Bernstein over universele grammatica van muziek

Bernstein, Leonard, *Leonard Bernstein at Harvard: The Norton Lectures*, geluidsopnames, Columbia M2X 33017, M3X 33020, 33024, 33028, M4X 33032: 1973

blz. 154: atonale muziek

Philippot, Michel P., *Arnold Schönberg and the Language of Music*, Perspectives of New Music, Spring-Summer 1975

Philippot meent dat het betitelen van Schönberg als 'een grammaticus' een enorm compliment inhoudt, want Schönberg excelleerde met het uitvinden van een nieuwe syntaxis, meer dan met het uitvinden van een nieuw 'alfabet', zoals Edgar Varèse deed. De belangrijkste functie van van regels bij muzikale composities, aldus Philippot, is een informatiestroom op gang te houden waarin het voorspelbare in evenwicht is met het verrassende. Hij schrijft:

Nu we weten dat de regels verschillende malen zijn gewijzigd in de afgelopen eeuwen, dat de muziek van het ene tijdperk dus ook verschilde met die van een ander tijdperk, maar dat ze steeds werd geaccepteerd, lijkt het erop dat de aard van deze regels uiteindelijk van geringe importantie is, maar dat, anderzijds, hun *kwantiteit* zeer belangrijk en vrijwel stabiel is in de tijd. Zo moest het genie van Schönberg er wel in slagen nieuwe regels te ontwerpen en toe te passen, daar ze rechtstreeks ontsproten aan de voorgaande in de toen *vloeiende staat der muziek*, en het moest hem mogelijk zijn om, binnen zijn systeem, een onontbeerlijke evenwicht te vinden tussen vrijheid en beperking.

blz. 154: 'Tonaliteit is niet slechts de reactie [...].'

Jackendorff, Ray, boekbespreking van Bernstein, Leonard, *The Unanswered Question*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., in *Language* 53(4) blz. 883-894: 1976

blz. 155:

Jung, C.G., in C.G. Jung en W. Pauli, *Naturerklärung und Psyche*, Zürich, 1952

blz. 156: 'en systeem van regels en vormen.'

Chomsky, Noam, in gesprek met de auteur.

DEEL IV - HOE DE HERSENEN ALLES SAMENVATTEN

16. De hersenen als kat op een heet zinken dak en andere vermeende waarheden

blz. 161: Shannon over computers

Shannon, Claude E., *Computers en Automata*, Proceedings of the Institute of Radio Engineers 41, blz. 1234-1241: 1953

blz. 163: 'drie soorten gebeurtenissen'

Rose, Steven, *The Concious Brain, herziene ed.*, Penguin Books, Hammonds-worth, Engeland: 1976

blz. 164: Wiener over onderscheid mechanische techniek en communicatie-techniek

Wiener, Norbert, *I Am a Mathematician: The Later Life of a Prodigy*, Cambridge, Mass. USA, MIT Press: 1966

blz. 164, 165: McCarley en Hobson over Freud

McCarley, Robert W., & Hobson, J. Allan, *The Neurobiological Origins of Psychoanalytic Dream Theory*, American Journal of Psychology 134(11) blz. 1211-1221: 1977

blz. 167: Schramms ondermijning van de kogeltheorie
Schramm, Wilbur, *Mass Communication*, in Miller G.A. (ed.),
Communication, Language and Meaning, Basic Books, New York: 1973

17. De beleidslijnen van het zien

blz. 171, 172: 'het onbevangen oog bestaat niet'

Gombrich, Ernst, *Art and Illusion: A Study in the Psychology of Pictorial Representation*, Pantheon Books, New York: 1961

blz. 172: 'hersenen de wereld niet uitsluitend waarnemen [...]'

Gregory, Richard, *Eye and Brain: The Psychology of Seeing*, World University Library/McGraw-Hill, New York: 1976

blz. 173 e.v.: Gibsons theorieën

De belangrijkste werk van Gibson op het gebied van waarnemen zijn:

Gibson, J.J., *The Perception of the Visual World*, Houghton Mifflin, Boston: 1950

Gibson, J.J., *The Senses Considered as Perpetual Systems*, Houghton Mifflin, Boston: 1966

Gibson, J.J., *The Ecological Approach to Visual Perception*, Houghton Mifflin, Boston: 1979

blz. 178: 'enkele projecties al genoeg zijn [...]'

Shaw, R., & Wilson, Buford, *Abstract Conceptual Knowledge. How Do We Know What We Know*, in Klahr, David (ed.), *Cognition and Instruction*, Lawrence Erlbaum Ass. Hillsdal N.J., USA: 1977

blz. 178: 'Ideeën zijn niet in de geest, noch [...]'

Shaw, R., & McIntyre, M., *Algoristic Foundations to Cognitive Psychology*, in Weimer, Walter B., & Palermo, David S. (eds.), *Cognition and the Symbolic Processes*, blz. 360, Lawrence Erlbaum Ass./Wiley, New York: 1974

blz. 179: 'kernbegrippen'

Shaw, R., & Wilson, Buford, *Abstract Conceptual Knowledge. How Do We Know What We Know*, in Klahr, David (ed.), *Cognition and Instruction*, Lawrence Erlbaum Ass. Hillsdal N.J., USA: 1977

blz. 179: 'Een belangrijk inzicht [...]'

Shaw, R., & Wilson, Buford, *Abstract Conceptual Knowledge. How Do We Know What We Know*, in Klahr, David (ed.), *Cognition and Instruction*, Lawrence Erlbaum Ass. Hillsdal N.J., USA: 1977

blz. 179: 'Een waarnemer is een [...]'

Gibson, J.J., *The Senses Considered as Perpetual Systems*, Houghton Mifflin, Boston: 1966

blz. 180: 'bewijs lijkt te zijn dat de perceptuele [...].'

Shaw, R., & McIntyre, M., *Algoristic Foundations to Cognitive Psychology*, in Weimer, Walter B., & Palermo, David S. (eds.), *Cognition and the Symbolic Processes*, blz. 360, Lawr. Erlbaum Ass./Wiley, New York: 1974

blz. 181: 'een aantal Amerikaanse schoolkinderen'

Torrance, Paul E., *Tendency to Produce Unusual Visual Perspective as a predictor of Creative Achievement*, *Perceptual and Motor Skills* 34(3) blz. 911-915: 1972

blz. 181: 'een ideale decodeerder'

Shannon, Claude E., *The Bandwagon*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Transactions on informationtheory IT-2(3) blz. 3: 1956

18. Bodem en piek van het geheugen

blz. 183: Simonides-verhaal

Yates, Francis, *The Art of Memory*, Univ. of Cicago Press, Chicago: 1966

blz. 185, 186: Shannons redundantie-experiment

Shannon, Claude E., in Shannon, Claude E., & Weaver, Warren, *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, Urbana, Illinois: 1949

blz. 186: 'John is eager to pease'

Blumenthal, A. & Boakes, R. *Prompted Recall of Sentences: A Further Study*, *Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour* 6 blz. 674-675: 1967

blz. 187: 'Zoals Bransford aantoon. onthouden mensen [...]'

Bransford, John D., *Human Cognition: Learning, Understanding and Remembering*, Vanderbilt University/Wadsworth Publishing, Belmont, California: 1979

blz. 188: Jenkins werk

Jenkins, J.J., *Remember the Old Theory of Memory? Well, Forget It*, *American Psychologist* 29 blz. 785-795: 1974

blz. 188n, 189n: Johnson over kinderartsen

Johnson, Paul, in gesprek met de auteur

blz. 190: 'Elke analyse zal uiteindelijk in het [...]'

Jenkins, J.J., *Remember the Old Theory of Memory? Well, Forget It*, American Psychologist 29 blz. 785-795: 1974

blz. 190: 'Jenkins vermoedt dat deze schijnbare tegenspraak [...]'

Jenkins, J.J., *Can We Have a Theory of Meaningful Memory*, in Solso, R.L. (ed.), *Theories of Cognitive Psychology: The Loyola Symposium*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey: 1974

blz. 191, 192: Experimenten van Bransford en Franks

Bransford, John, & Franks, Jeffrey, *The Abstraction of Linguistic Ideas*, Cognitive Psychology 2 blz. 331-350: 1971

blz. 193: 'Elke bestudering van kennisstructuren [...]'

Jenkins, James J., in gesprek met de auteur

blz. 193: 'Bransford heeft beschreven hoe de geheugenreconstructie [...]'

Bransford, John, & Franks, Jeffrey, *The Abstraction of Linguistic Ideas*, Cognitive Psychology 2 blz. 331-350: 1971

blz. 195: 'Ik denk dat we uiteindelijk moeten concluderen [...]'

Jenkins, J.J., *Language and Memory*, in Miller, George A. (ed.), *Communication, Language and Meaning: Psychological Perspectives*, Basic Books, New York: 1973

19. Informatie via dromen

blz. 197: 'elke droom een instrument [...]'

Jung, C.G., *Die Praktische Verwendbarkeit der Traumanalyse*, in Jung, C.G., *Wirklichkeit der Seele*, Zurich: 1934 De auteur is uitgegaan van een vertaling in het Engels.

blz. 197: 'elke droom een instrument [...]'

Jung, C.G., *Approaching the Concious*, in Jung, C.G., Franz, M.-I. von, Henderson, J.L., Jacobi, J., & Jaffé, A., *Man and His Symbols*, blz. 37, Dell, New York: 1964

blz. 198: 'Ze schijnen samen te hangen [...]'

Jung, C.G., *Vom Wesen der Traüme*, Ciba-Zeitschrift 9 blz. 99: 1945, Engelse vert. door Hull, R.F.C., Pantheon Books, New York: 1954

blz. 199: werk van Hobson en McCarley
Hobson, J. A., McCarley, R.W., *The Brain as Dream State Generator: An activation-Stimulation Hypothesis of the Dream Process*, American Journal of Psychiatry 134(12) blz. 1335-1348: 1977

blz. 201, 202: 'verborgen waarnemer'

Hilgard, E., *Divided Consciousness: Multiple Controls in Human Thought and Action*, blz. 185, Wiley, New York: 1977

20. Het links en rechts van het weten

blz. 204n: 'Objectief gemeten zijn de verschillen [...].'

Yin, Robert K., in gesprek met de auteur.

blz. 205: experiment linkerhemisfeer

Dit experiment staat beschreven in: Gazzaniga, M. S., & Le Doux, J. E., *The Integrated Mind*, Plenum, New York: 1977

blz. 206: lijst met linker- en rechterhemisfeerkennis

Bogen, Joseph E., *Some Educational Implications of Hemispheric Specialization*, in Wittrock, M.C., *The Human Brain*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., USA: 1977

blz. 207: 'terwijl de rechterhelft bijna spraakloos is'

Van de gescheiden rechterhemisfeer is bekend dat het met moeite leidt tot het gebruik van korte, eenvoudige woorden zoals *klap*, *kop* en *zes*. Deze helft bezit een zekere mate van begrip van taal. In 1981 meldden Jeffrey Elman, Kunitoshi Takahashi en Yasu-Hiko Tohsaku dat de beide verschillende wijzen van schrijven (*Kanji* en *Kana*) niet op dezelfde wijze door de hersenen werden behandeld (*Lateral Assymetries for the Identification of Concrete and Abstract Kanji*, *Neuropsychologia* 19(3) blz. 407-412). *Kanji* is in wezen een ideografisch systeem, waarvan de symbolen woorden representeren en geen relatie hebben met de klank. *Kana* is echter een fonetisch systeem waarin elk element een lettergreep vertegenwoordigt en waarbij er een sterk verband bestaat tussen het symbool en de uitspraak van het woord. De rechterhemisfeer werkt beter met *Kanji* dan met *Kana*, als het betreffende woord een zelfstandig naamwoord is.

blz. 207: 'waardoor een hele lettergreep een vloeiende [...].'

Lieberman, A.M., *The Specilization of the Language Hemisphere*, in Schmitt, F.O., & Worden, F.G. (eds.), *The Neurosciences: Third Study Program*, blz. 43-56, MIT Press, Cambridge, Mass.: 1974

blz. 208: 'het gedrag van de "kleine" hemisfeer'

Gardner, Howard, & Hamby, Suzanne, *The Role of the Right Hemisphere in the Organization of Lingistic Materials*, artikel gepresenteerd opp het International Neuropsychology Symposium, Dubrovnik, Joegoslavië 1979

blz. 210: 'een zwaar hart kan werkelijk verschil uitmaken'

Gardner, Howard, & Winner, Ellen, *The Comprehension of Metaphor in Brain-Damaged Patients*, Brain 100 blz. 717-729: 1977

blz. 211: werk van Hoffman en Honeck

Hoffman, Robert R., & Honeck, Richard P., *The Bidirectionality of Judgements of Synonymy*, Journal of Psycholinguistic Research 5(2) blz. 173-184: 1976

blz. 212, 213: werk van Verbrugge

Verbrugge, Robert, in gesprek met de auteur.

blz. 213: 'gekristalliseerde intelligentie, of kennis [...].'

Zaidel, Eran, aangehaald in Schmeck, Harold M. Jr., *'Two Brains' of Man: Complex Teamwork*, New York Times 8 januari 1980 blz C1-C3: 1980

blz. 213: 'Wanneer een vaardigheid of taak [...].'

Zaidel, Eran, in gesprek met de auteur.

blz. 214: opstellen van schizofrenen

Winterowd, W. Ross, *Brain, Rethoric and Style*, Language and Style 13(3) blz. 151-181: 1980

21. De tweede-theoremamaatschappij

blz. 217: 'We moeten verder gaan dan de verleiding om [...].'

Prigogine, Ilya, aangehaald in Thurston, Carol M., *Ilya Prigogine - Towards a Unity of Science and Culture*, Christian Science Monitor 8 oktober 1980, blz. 16: 1980

blz. 218: '... het gedrag van een georganiseerd systeem [...].'

Hutten, E.H., *Informazione, Spiezone e Significato*, Ermando, Rome: 1975 (vert. in het Italiaans van het verder ongepubliceerde *Information, Explanation and Meaning.*)

blz. 219, 220: 'John's smoking bothers me'

Elgin, Suzette H. (liguïste), in gesprek met de auteur.

blz. 220: *kosmos en taxis*

Hayek, F.A., *The Constitution of Liberty*, University of Chicago Press, Chicago: 1960

Hayek, F.A., *Law, Legislation and Liberty* vol. 1 *Rules and Order*, University of Chicago Press, Chicago: 1973

blz. 221: 'Er is een interessant, zij het controversieel, onderscheid [...].'
Hart, H.L.A., *The Concept of Law*, Clarendon Press, Oxford: 1975

blz. 222: 'De mens is evenzeer een regelvolgend [...].'
Hayek, F.A., *Law, Legislation and Liberty* vol. 1 *Rules and Order*, University of Chicago Press, Chicago: 1973

blz. 222: 'dank zij de erkenning [...].'
Hayek, F.A., *Law, Legislation and Liberty* vol. 1 *Rules and Order*, University of Chicago Press, Chicago: 1960

blz. 222, 223: gesprek Chomsky met Ronat
Chomsky, Noam, *Language and Responsibility*, gebaseerd op gesprekken met Mitsou Ronat (vert. Viertel, John), Pantheon Books, New York: 1979

blz. 223: het falen van kunstmatige talen
Pei, Mario, *The Story of Language*, Mentor/New American Library, New York: 1966

Nawoord: Aristoteles en het DNA

blz. 227: 'Het gezichtspunt en de benadering van Aristoteles'
Randall, John Herman, *Aristoteles*, blz. 126, Columbia Univ. Press, New York: 1960

blz. 230: 'Een gedrocht hoort natuurlijk tot de klasse [...].'
De auteur is uitgegaan van de Engelse vertaling van Aristoteles' werk.
Aristotle, *Generation of Animals*, (vertaling van *De generatione animalum* door A.L. Peck), Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., USA: 1942

blz. 230, 231: 'Aristoteles dacht dat we op grond van [...].'
Goodwin, B.G., *Biology and Meaning*, in Waddington, C.H. (ed.), *Towards an Theoretical Biology* 4 blz. 269, Aldine Atherton, Chicago: 1972

blz. 231: 'Een bepaalde kiem laat [...].'
De auteur is uitgegaan van de Engelse vertaling van Aristoteles' werk *De partibus animalum*:
Aristotle, *Parts of Animals*, in McKeon, Richard (ed.), *The Basic Works of Aristotle*, blz. 649, Random House, New York: 1941

blz. 231: Max Delbrück over Aristoteles
Delbrück, Max, *How Aristotle Discovered DNA*, in Huang, Kerson (ed.), *Physics and Our World: Symposium in Honor of Victor F. Weisskopf*, American Institute of Physics, New York: 1976

Register

A

- Adams, Henry 45
- algebra 111, 176
- algoritmen 111-113
 - in DNA 111-114, 117, 120, 121
- Al-jabr w' al-mugabala* (Al-Kowarizmi) 111
- Al-Kowarizmi 111
- Al-Mamun 111
- Ambystoma tigrinum* 120
- aminozuren 80, 94
- anageneseprocess 114
- anti-atomisten 33, 34
- anti-toevalsmechanismen
 - in boodschappen 140
 - in dromen 197
 - in de evolutie 98, 103
 - grammatica als 85, 140
 - in hersenen 87, 93
 - in informatietheorie 98, 224
 - natuurlijke selectie als 98
 - in waarnemen 181
- apen
 - hersenen van 117, 120, 124
 - tijdsbestek voor het ontstaan van 140
 - vergeleken met mensen 117-118
- a posteriori beweringen 141, 142
- a priori beweringen 141, 142, 156
- arbeid
 - als energie 32
 - en warmte 32, 35, 36
- archetypen 154, 155
- Aristoteles
 - en betekenis van het stoffelijke 231
 - DNA-onderzoek en 231
 - doorgifte van zijn werk 232
 - huidige vijandigheid jegens 231
 - en informatie 227, 230, 231
 - mechanistische en materialistische verklaringen verworpen door 266, 267
 - onbeweeglijke beweging, doctrine van 232
 - over het verband tussen informatie en energie 230
 - realiteit in vorm volgens 228-230

- verandering volgens 228, 229
- Ars Conjectandi* (Bernoulli) 47
- Art of Memory, The* (Yates) 183
- astronauten, historische 133, 134
- astronomie 232
- atoomtheorie 33, 34
- Austen, Jane 62
- Austin, George 210
- Australopithecus* 128, 129
- axalotls, neotenie bij 120

B

- bacteriën 113, 114
- Beauregard, Olivier Costa de 29
- behaviourisme 153, 166, 167
- Bell System Technical Journal* 16
- Bell Telephone Labs 16, 19, 23
- Bennett, William R., Jr. 100-103
- Berg, Alban 154
- Bernoulli, James 47, 53, 57
- Bernstein, Leonard 153
- betrekkelijke bijzinnen 148, 149
- Bigelow, Julian 20, 27
- binaire digits, zie bits
- biologie
 - cel als drempel voor ontdekkingen 230
 - DNA als aandachtspunt van 82
 - verband met linguïstiek 94
- bits (binaire digits) 65-69
 - definitie 65
 - foutencorrigerende codes en 67-69
 - gecodeerde waarschijnlijkheid en 65-66
- Black English 63
- Blake, William 18
- Bogen, Joseph 205, 206, 210, 214
- Bolk, Louis 139
- Boltzmann, Ludwig
 - achtergrond van 33, 34
 - als atomist 33, 34
 - entropieonderzoek van 34, 35, 39, 47, 75
 - entropievergelijking van 41, 42, 59
 - Maxwells invloed op 34, 35
 - over ervaring 34
 - over de grenzen van kennis 39, 41
 - over informatie 39, 41

- thermodynamisch onderzoek 34, 40, 57
- boodschappen
- anti-toevalsmechanismen 140
- beeldspraak in 210, 212, 213
- Brownse beweging vergeleken met 25
- context van 211
- gecodeerd in bits 65-68
- als lage entropie 30
- en meta-uitspraken 112, 113, 118
- onzekerheid in 25, 26, 55, 59, 60
- redundantie in 64, 171
- ruis in 20, 23, 24, 59, 66, 67, 135
- als serie gebeurtenissen 25
- soorten 60
- en statistiek 26
- met succes verzenden van 97, 98
- vervorming 136
- voorkennis 55-57
- vrijheden aan de bron 140, 171, 218
- en waarschijnlijkheid 55-57, 65, 66
- als zelfherstellende codes 67
- Borel, Émile 50
- Boston Herald* 22
- Bransford, John
- geheugentests van 191, 192
- over reconstructie van het geheugen 193
- over structuur van het geheugen 186, 187
- Bridgeman, P.W. 45
- Britten, Roy 113, 114, 118, 124
- Brown, Robert 24, 25
- Brownse beweging en 24, 25
- Bruckner, Anton 33
- Brunner, Jerome 123
- Butler, Samuel 161

C

- Camillo, Giulio 183, 184
- Cardano, Gerolamo 49, 50
- Carnot, Sadi 31, 32, 39
- catastrofisme 125
- cerebrale cortex 173
- chemie en informatietheorie 16
- chimpansee, zie apen
- Chomsky, Noam
- abstracte zinsvormen 136
- en beeldspraken 212
- beperkingen in zijn theorieën 148
- biologische voorwaarden voor taal 219
- competence volgens 137, 157, 195
- dieptestructuur 138, 139
- over ervaring 142, 153
- generatieve grammatica 83, 94

- Gregory en 172, 173
- over informatieverwerking 139, 140
- kritiek op 156
- over linguïstische creativiteit 82, 156, 212
- linguïstische vernieuwingen 95, 97, 110, 140, 141, 143, 145, 146, 219
- mathematische grondslagen van zijn werk 143
- over menselijke taalcompetence 89
- over mentale bewerkingen 136
- over natuurlijke selectie 83, 84
- over onbewuste kennis 145
- over oppervlaktestructuur 138, 139
- over persoonlijke rol van taal 156
- over recursieve functies van taal 143
- over regelgeleide kennis 212
- Shannon, affiniteit met 136, 143
- over sociale orde 222
- over spreektaal als systeem met een eindig aantal mogelijkheden 110
- versus structuralisten 136
- over syntaxis als centrale punt 137, 157, 158
- over taal als algemene communicatieverordening 180
- over taal als goedgedefinieerd systeem 136
- taalonafhankelijke theorieën 142
- en taalperformance 138, 157, 195
- en taalregels 82, 83
- en toepassing van traditionele linguïstiek 62
- transformatieele grammatica 110, 151, 152
- universele grammatica 109, 140, 146, 147, 155, 156, 175
- Christina van Zweden 91
- chromosomen 80, 81
- Clausius, Rudolf 32, 33
- codes 66-69
- fouten corrigerende 66-69, 97, 135, 171
- ideale 68
- linkerhemisfeer-apparaat voor 207
- ontwerp van 135
- voor ruimtevaart 68
- Shannons tweede theorema toegepast op 218
- sleutels 66
- als set statistische regels 218
- vergeleken met mythen en dromen 202
- verhoogde complexiteit in 218, 219

- vrijheden in 218
- codonen 81, 105, 106, 109
- communicatie
 - Brownse beweging en 24, 25
 - bijkomende boodschappen bij 59
 - communicatietechniek 164
 - kogeltheorie 167
 - in de natuur 59
 - en ruis 24, 66-68, 97, 171
 - en wiskunde 20
- competence 137, 157, 195
- complexiteit
 - biologische 89, 103, 114, 218, 219
 - van coderingen 218
 - complexiteitsindernis 91, 219
 - van computers 224
 - als eigenschap 89, 91
 - in de evolutie 104, 105, 115, 218, 219
 - in het geheugen 191, 192
 - van de hersenen 127, 128
 - in de informatietheorie 223, 224
 - in materie en natuur 217
 - van milieus 114
 - in open systemen 88, 89
 - opkomst van 89, 90
 - als quasithermodynamische overwegingen 90
 - en redundantie 63, 64, 91, 92, 218
 - regels voor het ontstaan van 91, 92
 - van de samenleving 220-224
 - in taal 87, 157
 - en waarschijnlijkheidslogica 90, 91
- computers
 - attitude ten opzichte van 225
 - complexiteit van 224
 - als embleem voor de informatierevolutie 18
 - flexibiliteit in 168
 - en geprogrammeerd selectief vergeten 168
 - en hersenen vergeleken 161, 169, 194
 - letterlijke interpretaties door 168, 169
 - Levensspel 92-94
 - en modellen voor organische processen 92-94
 - natuurlijke selectie gesimuleerd door 115
 - en programmeringsspoekjes 168
 - en regelgeleide spelletjes 91-94
 - en subjectieve interpretaties 169
 - en variabiliteitsbeheersing 104
 - in de vroege jaren vijftig 161
 - en waarschijnlijkheidsexperimenten

- 100-103
- wereldnieuws gevolgd door 168, 169
- concepten, ontstaan van 212
- Conscious Brain, The* (S. Rose) 163
- Conway, John 93
- corpus callosum 205, 207
- creativiteit
 - concepten formeren 212
 - en structuur 224, 225
 - en taal 82, 141, 156, 212
 - en visuele waarneming 181
- Crick, Francis 18
- Cro-Magnonmens 129-132
- cultuur
 - en evolutie 128, 132-134
 - oorsprong van 128-130
 - paleolithische 132, 133
 - in de ijstijd 131
- cybernetica
 - definitie 21, 202
 - vergeleken met dromen en mythen 202
 - en visuele waarneming 180
 - werk van Wiener 21

D

- Dance of the Tiger* (Kurtén) 129
- Dante, Alighieri 183
- Darwin, Charles 84
 - over Aristoteles 227
 - en de *Beagle* 125
 - als geoloog 125
- Davidson, Eric 113, 114
- Decline of the West, The* (Spengler) 44, 45
- Delbrück, Max 231, 232
- Descartes, René 91
- determinisme
 - in de klassieke communicatietheorie 26, 218
- DNA (desoxyribonucleïnezuur)
 - algoritmen in 111-114, 116, 117, 120
 - archetypen gespecificeerd door 155
 - Aristoteles en 230, 231
 - in bacteriën 113, 114
 - als centraal punt in de biologie 82
 - communicatiekanalen in 98
 - dubbele helix 18
 - en eiwitten 80, 81, 97, 105, 106, 110, 111, 113, 114
 - in de evolutie 81
 - generatieve grammatica en 82-85
 - grammaticale universalis in 146
 - herhaalde sequenties 126

- informatie in 18, 79, 80, 82, 83, 97, 135, 231
 - in lagere organismen 103, 104, 105, 127
 - menselijk 105, 117, 118, 123
 - meta-uitspraken in 113
 - niet-letterlijke codes in 81
 - van ØX174-virus 105, 106
 - redundantie in 99, 102-104, 126, 127
 - regels binnen 109-111, 148, 220
 - regulerende sequenties 117
 - taalkundige universalis in 146 /
 - toevalsmutaties 112
 - 'uitspraken' in 113
 - verscheidenheid van produkten 106
 - in vertebraten 103
 - vrijheden en 103, 104
 - in zoogdieren 113, 114
- dromen 197-202
- afwijkingen 199, 200
 - anti-toevalsmechanismen in 197
 - betekenis van 200, 201
 - als boodschap 197, 198-200
 - context voor 199
 - entropieverlaging bij 197
 - en evolutie 201
 - fysiologische processen 200, 201
 - en geheugen 185, 200
 - hersenactiviteiten tijdens 201
 - informatie-overdracht bij 198-205, 202
 - integratie van psychisch leven in 198, 200
 - leeraspecten van 202
 - lichamelijke paralyse tijdens 201
 - en onbewuste wensen 199
 - patronen 198
 - en rem-slaap 200, 201
 - slaap beschermd door 199, 210
 - structuur 198
 - symbolen in 197, 198
 - als theoriegenererend ontwerp 197
 - vastleggen van kennis in 201
 - als verdringing 197, 199, 200

E

- Ebbinghaus, Hermann 190, 191
- Eddington, Arthur 73
- Eden, Murray 84, 112
- Einstein, Albert
- over Brownse beweging 24
 - over geestesconstructies 143, 152, 153
- eiwitten
- aan het celoppervlak 128

- in groeiende embryo's 1115, 116
- in de hersenen 117
- bij kinderen 116
- mate van veranderingen 115
- en mutaties 115
- en natuurlijke selectie 81
- bij primaten 117
- relatie tot DNA 80, 81, 97, 105, 106, 110, 111, 113, 114

Eliot, T.S. 89, 96

embryo-ontwikkelingstheorie 119, 120

Encyclopedia Americana 22

energie

- anti-atomisten en 33, 34
- arbeid als 32
- behoud van 32
- als continue stroom 33
- en entropie 30, 32, 33, 43
- volgens Freud 18, 165, 199
- en hersenen 166
- en informatie 230
- omzetting van 32
- orde versus chaos bij 29, 30
- warmte 29, 32, 35, 36
- wetten 32, 33

Engelse taal 61, 102, 103, 148, 149

- beschrijvingen 219
 - Black English 63
 - gerund 219
 - redundantie in 63, 185, 186
- entropie, zie ook thermodynamica, tweede wet
- aantrekkelijkheid van het begrip 17
 - bibliotheek als voorbeeld 41, 42
 - Boltzmanns vergelijking 41, 42, 59
 - en dromen 197
 - en energie 29, 30, 36, 44
 - en evolutie 104, 105
 - en hersenen 184
 - als index voor onzekerheid 55
 - in de informatietheorie 46, 57, 98
 - als irreversibele chaos 35, 44
 - en kennisverlies 39, 41-43
 - Layzer over 75
 - Maxwells duiveltje en 43, 76, 230
 - objectiviteit van 29
 - oorsprong van het begrip 31
 - als relatie tussen warmte en energie 32, 33
 - Shannons vergelijking 17, 18, 184, 217
 - statistische aard van 45
 - subjectiviteit van 29
 - theoretische instabiliteit van 29
 - als thermodynamische pijl 74

- toepassingen in verschillende disciplines 45
- toestanden van lage, hoge en maximale entropie 29, 30, 35, 41, 43, 55
- in de tijd 73, 75
- als veelzijdig begrip 44
- en waarschijnlijkheid 29, 34, 35, 40, 41, 44, 47
- en de wetten van de grote getallen 47, 48

equifinale toestanden 88

Erewhon (Butler) 161

ervaring

- Boltzmann over 34
- Chomsky over 142, 153
- en geheugen 189-191
- gekristalliseerde intelligentie vanuit 213
- hersenen als dociele opslag voor 181

Esperanto 223

evolutie

- anagenese in 114
- anatomische symmetrie in 203
- en anti-toevalsinstrument 98, 103
- biologische trekken in verloop 116
- complexiteit van 104, 114, 115, 218
- van cultuur 128, 132-134
- en DNA 81
- en droomervaringen 201
- en entropie 104, 105
- en genduplicatie 127, 128
- en genen als versnellende elementen 218
- en genetische informatie 19, 135
- van de hersenen 128
- als informatieproces 103, 104
- als inventief proces 69
- kosmische uitdijning als voorwaarde voor 75
- en de mens 115, 117, 121, 122, 224
- en meta-uitspraken 113
- en missing links 126
- en neotenie 119-122
- en overspecialisatie 119, 120
- Shannons tweede theorema toegepast op 69, 98, 104, 218
- snelheid van veranderingen 115, 125
- en spel 124
- sprongen in 125, 126, 128
- en taal 89, 132
- thermodynamische pijlen in 104
- en toevalsmutaties 81
- voorwaartsgerichtheid van 104

- en waarneming 179, 180
 - en werktuiggebruik 123 129, 132
- evolutietheorieën
- aanpassingswetten 148
 - en DNA 135
 - geleidelijkheidsthese 125
 - incompleteheid van 84, 220
 - en informatietheorie 97-99
 - en willekeurigheid 85
 - synthetische theorie 84

F

fagen 103

Fano, Robert 18

A Farewell to Arms (Hemingway) 88

filosofie

- informatietheorie en 16
- versus perceptie 173

Finnegans Wake (Joyce) 54

fluctuaties 88

fonologie 145

Fortune 17

fossielen 125-127

Fowles, John 124

Franks, Jeffrey 191

Franse taal 149

Freud, Sigmund

- en doodsverlangen 45
 - droomtheorie 197-199
 - energieconcept van 18, 164, 199
 - entropie in het werk van 45
 - hersenonderzoek van 164, 166
- fruitvliegen, verwante soorten 117
- fysica, zie natuurkunde

G

Gamble, Clive 130

Gardner, Howard 123, 153, 208, 210

Gardner, Martin 93, 94

Garstang, Walter 119n

gassen 34, 35, 48, 49, 76

Gatlin, Lila L.

- en DNA-basen 97
 - over oorsprong van het leven 104, 105
 - over organisme-onafhankelijke organismetheorie 142
 - tweede theorema-evolutie voorgesteld door 69, 98, 104, 218
- geheugen 183-196
- abstracties 192, 196
 - als automatische machine 193
 - en betekenis 191-195, 197
 - bewerkingen binnen 192, 193

- bottom-up benadering van 188
- categorieën en classificatie in 184, 187
- complexiteit 192
- contexten voor 188-191
- definitiëren van 189
- en details 193
- dieptestructuur 186, 187
- en dromen 185, 200
- Ebbinghaus' curve 190, 191
- en ervaringen 189-191
- fragmenten in 191
- geheugenmachines 183, 184
- heuristisch denken en 188n
- hiërarchische ordening 187
- en hogere mentale functies 190
- als idiosyncratisch 187, 188, 190, 191, 193-195
- informatiebewerking in 166, 167, 223, 190, 191-193
- mate van verlies in 190, 191
- mentale toestand van invloed op 193
- naïveteit van 191
- als onbewuste kennis 146
- onbewuste veranderingen 193
- oppervlaktestructuur 186, 187
- parafraseren in het 187
- perceptie gecombineerd met 174
- reconstructies 193
- redundantie in 183, 186
- en regels 195
- en selectiviteit 166
- sociale reflexen 193
- spelletjes 184, 185
- strategieën 183-185
- structuurafhankelijkheid van 187, 188
- syntaxis van 183, 187, 190, 195, 214
- systematische verdraaiingen 193
- tests 190-192
- theorieën over 186, 188, 189
- top-down benadering van 189, 190
- als variabele 195
- verhalende structuur van 184, 185
- verlies in 190, 191
- en verwachtingen 193
- en voorspelbaarheid 184
- wetten voor 189
- Gele Gevaar, rapport 27
- genen
 - algoritmen in 111, 112, 220
 - chemische symbolen in 80, 99, 105, 106
 - communicatie tussen 59
 - duplicaten van 126-128
- van embryo's in het moederlichaam 115, 116
- en evolutie 18, 127, 128, 135, 218
- grammatica van 110, 111
- informatiesystemen van 61, 69, 79, 104, 116, 126, 128, 218
- en mutaties 81, 115, 125, 127
- ongebruikte informatie 126
- en programmatische veranderingen 113
- regulerende 117, 118, 127, 128
- en Shannons tweede theorema 218
- structurele 81, 111, 113-115, 117, 118, 125, 127, 129
- tijdsbepaalde expressie 117-120, 124, 127
- uniformiteit en variatie 116
- en variatieregulatie 104
- veranderingspatronen in 114
- vergeleken met taal 79, 87
- en voorgeprogrammeerde verlengde jeugd 116
- Georgescu-Roegen, Nicholas 36
- gereedschap, gebruik van 122, 123, 129, 132, 134
- geschiedenis
 - geologische 125, 126
 - als kroniek van het nieuwe 73
 - en thermodynamica 45
 - tijdpijl 74, 75, 225
- getallen
 - als a priori kennis 155
 - natuurlijke 155
 - negatieve 49
 - regels 82, 83
- Gibson, James J.
 - invloed 173
 - over licht 173-174, 190
 - over omgeving 173, 174
 - over visuele informatie 174
 - over waarnemingsinvarianten 174, 175, 178, 181
 - over zichzelf afstemmende systemen 179
- gigabits 68
- Gödel, Kurt 94, 95
- gokken en waarschijnlijkheidstheorie 50, 51
- Gombrich, Ernst 171, 172
- Good, I.J. 54
- Goodman, Morris 115-117
- Goodwin, B.G. 79, 82, 230, 231
- Gould, Stephen J. 126
- grammatica
 - aanleren van 140
 - als anti-toevalsinstrument 85, 140
 - beschrijvingen 219

- en competentie 140
 - en erfelijkheid 110, 111
 - als informatie-apparaat 147
 - en Keplers wetten 152
 - onbewuste regels 146, 147
 - als psychologische realiteit 147
 - als systeem met eindig aantal mogelijkheden 110
 - transformationele 110, 145
 - universele 109, 140, 142, 147-152, 197, 222, 223
 - en zinnen 139, 140
- Grassé, Pierre-Paul 84
- Gregory, Richard 172, 173
- Grieken, politieke theorie der 220
- groepen theorie 175-179
- grote getallen, wet van 47-50

H

- Hacking, Ian 51, 52
- Hamby, Suzanne 208
- Hamlet* (Shakespeare) 100, 101
- Hardy, A.C. 119n
- Hardy, G.H. 22
- Harris, Zellig 146
- Hart, Herbert 221
- Harun Al-Rashid 111
- Have His Carcase* (Sayers) 45
- Hayek, F.A. 220-222
- Hebreeuws 149
- heelal, zie universum
- Hegel, Georg Wilhelm Friedrich 33
- Heidegger, Martin 228
- Hemingway, Ernest 101
- hersenen
- aardse georiënteerdheid van 208-210
 - abstracte linguïstieke principes 136
 - anti-toevalsinstrumenten in 87, 151
 - asymmetrie van de 203
 - bilaterale besturing 203
 - biologische informatie bij de aanleg van 109
 - als boodschappenbron 140
 - boodschappendoorgifte in 161, 162, 164, 166, 167
 - codeersysteem in 207
 - als communicatiemiddel 164
 - complexiteit van 127, 128
 - en computers 161, 162 169, 194
 - en conceptuele kennis 212, 213
 - convergente functies 206
 - corpus callosum 205, 207
 - creativiteit en 212
 - deductieve functies 206
 - dromen en 199-201
 - als droomtoestand-genererend orgaan 199
 - eigenzinnigheid 194
 - eiwitten in 117
 - energie en 165, 166
 - entropieverlaging in 184
 - evolutie en 128
 - feedback en 194
 - gekristalliseerde intelligentie binnen 213
 - gelaatscodering en 204
 - genetische grondslagen van 127, 128
 - gescheiden hersenhelften 207
 - hemisferische ongelijkheden 204, 205, 207
 - als hulpeloos slachtoffer 167
 - en hypnose 201, 202
 - ingebouwde inexactheid 162, 163
 - intellectuele eerlijkheid van 173
 - interacties tussen beide hemisferen 205, 207
 - letterlijke interpretaties door 208-210
 - linkerhemisfeer, beperkingen 206
 - linkerhemisfeer, functies 204-208, 210-215
 - van mensen en apen vergeleken 117, 120, 125
 - metabolische activiteit van 164
 - metaforenbegrip van 210, 212, 213
 - navertellen, begrip bij 208, 209
 - van Neanderthalers 128-130
 - neerwaartse en opwaartse strategie 204
 - neotenie bij de ontwikkeling van 119-121
 - neuronen in 161-163, 166
 - non-lineariteit van 194
 - onafhankelijke ontwikkeling van de hemisferen 205
 - oogbewegingen en 200
 - organisatiepatronen van 121, 122
 - pons 199, 200
 - rechterhemisfeer, functies 204-206, 208-215
 - rechterhersenen, beschadiging van 208-210
 - redundantie in 163
 - regelgeleide kennis 212, 213
 - selectiviteit 166, 167, 171
 - spraakcentrum 203, 205, 207
 - subjectieve interpretaties in 169
 - synapsen in 162, 163
 - syntaxbegrip en 207-209, 212-214

- transformatieele vaardigheden 207
- verborgen waarnemer in 202
- van vertebraten 218
- visie van behaviourisme op 167
- visie van Freudianen 164-166, 199
- en waarnemen 120, 171-173, 180, 181
- heuristisch denken 188n
- Hilbert, David 22
- Hilgard, Ernest 201, 202
- Hobson, Allan 164, 165, 199-201
- Hoffman, Robert 211, 212
- Homo erectus* 129
- Homo habilis* 129
- Homo sapiens sapiens* 203
- homunculus 231
- Honeck, Richard 211, 212
- horen 166
- Hutten, Ernest 218
- Huttenlocher, Peter 121, 122
- Huxley, Julian 114
- hypnose 201, 202

I

- Idiom Neutral, taal 223
- Ido, taal 223
- immuunsysteem 115, 116
- implosiemethode bij nucleaire ontploffingen 90
- Inferno* (Dante) 183
- informatie
 - en actualisering van het mogelijke 229
 - in DNA 18, 79-83
 - in dromen 198-200, 202
 - en energie 230
 - en entropie 39, 41-44
 - en geheugen 166, 167, 190, 192, 193
 - in genen 69, 79, 104, 116, 126-128, 218
 - in licht 173, 174
 - als maat voor nieuwigheid 73
 - meten van 65, 66
 - microscopische en macroscopische vormen 75-77
 - in de natuur 15, 227
 - in de omgeving 179
 - theorie als bron van 140, 141
 - als universeel verschijnsel 67, 142
 - verandering als essentieel voor 171
 - en verscheidenheid 40, 41
- informatietechnologie 15, 16, 164
- informatietheorie
 - adequate beschrijvingen volgens 219

- en anti-toeval 98, 224
- bij Aristoteles 227, 228
- boodschappenbronnen 135
- en complexiteit 223, 224
- en context 211
- en cybernetica 21
- en determinisme 218
- en entropie 46, 57, 98
- en evolutietheorie 97-99
- filosofische context 227
- fouten als thema in 171
- genetische toepassing 79, 80, 97, 98
- Heilige Graal van 68
- keuzen en beperkingen volgens 225
- versus klassieke communicatie-theorie 218
- oorlogsinspanningen, rol van 27
- oorsprong en ontwikkeling 15-28
- en orde 47, 224, 225
- overreacties op 18
- bij Plato en Aristoteles 227, 228
- redundantieconcept 59
- rijpingsproces 18, 19
- Shannons tweede theorema 67-69, 97, 98
- en statistiek 25-27
- en systemen als geheel 217-219
- en thermodynamica 57
- universele principes 15, 16
- en waarschijnlijkheidstheorie 54-57, 59, 60

Inge, William Ralph 45

intelligentie, gekristalliseerde 213

Interglossa, taal 223

Interlingua, taal 233

interne evidentie 51, 52

irreversibiliteit in thermodynamica 48

J

- Jackendorf, Ray 152, 154
- Jaina filosofie 51
- James, William 190
- Jaynes, Edwin 57
- Jenkins, James J.
 - over betekenis van ervaringen 194, 195
 - over curve van Ebbinghaus 190, 191
 - over geheugen 188, 189
 - over verstrengeling deelervaringen tot geheel 192, 193
- Johnson, Paul 188
- Joyce, James 62, 211
- Jukes, Thomas 105
- Jung, Carl G.

- over archetypen 155
- droomtheorie 197-200
- functies van het individu 197, 198

K

- Kant, Immanuel 141, 142
- kapitalisme, verscheidenheid en 225
- kennis
- beschrijvingen 219
 - conceptuele 212, 213
 - eenheid van 232
 - versus entropie 39-43
 - en ervaring 142
 - en Gödels onvolledigheidstheorema 95
 - en muziek 153
 - noodzakelijke grenzen van 39-42, 95, 175
 - onbewuste 145, 146
 - regelgeleide 212-214
 - en speltheorie 122, 123
- Keplers wetten voor planeetbanen 152
- Keynes, John Maynard 50, 54
- Khwarizmi, Al- 111
- King, Jack Lester 105
- King, Marie-Claire 117
- King Charlesspanniels 120
- Kinsbourne, Marcel 206, 207
- kosmische uitdijing 74, 75, 78
- kosmologisch principe 77
- kosmos* 220, 221
- kunst
- energithema in 18
 - menselijke ontwikkeling en 123
 - onbevangen oog in 171, 172
 - opkomstconcept in 89
 - naturalisme in 171, 172
 - prehistorische 131, 132
 - realiteit getoetst aan 172
- kunstmatige intelligentie, onderzoek naar 167
- Kurtén, Bjørn 129

L

- Lakoff, Robin 87, 88, 157, 158
- Laplace, markies Pierre Simon de 76
- Lasher, William 63
- Layzer, David
- en entropieprincipe 75
 - kosmisch symmetriepincipe 77, 78
 - over laplaciaanse superintelligentie 76-78
 - over macroscopische informatie 75
 - tijdpijlen 73-75
- Lebowitz, Fran 64

- leertheorieën 186
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von 22, 228
- letterlijke interpretatie 168, 169, 207-210
- leugendetectoren 193
- Levensspel 93-95
- Liber De Ludo Aleae* (Cardano) 50
- Liberman, A.M. 207
- licht, structuur van 173-175
- Life Game 93-95
- Lin, Edmund 113
- linguïstiek
- en biologie 93
 - Chomsky's nieuwe benadering 95, 97, 110, 141, 143, 145, 146, 219
 - grammatica's met eindig aantal toestanden 110, 111
 - moderne 135, 136
 - ontstaan 145
 - overvloed van gegevens in 219
 - en psychologie 158
 - wetenschappelijke status 145, 146
- linguïstische regels
- algoritmen in 111
 - definitie 109
 - en onbewuste kennis 146, 220, 221
 - recursieve 143
 - in spraak 140, 141
 - taal gedefinieerd door 109
 - transformatie 138-140, 151, 152
 - universalia 147, 148
 - voorwaarden voor 109
- literatuur
- energithema in 18
 - entropieprincipe in 45, 46
 - onzekerheid in 62, 63
- logica
- formele 90
 - Gödels Onvolledigheidstheorema 94, 95
 - jainaanse 51
 - meta-uitspraken 112
 - waarschijnlijkheidslogica 90, 91
- Lucas, J.R. 44
- Lyell, Charles 125

M

- maatschappij 220-224
- alternatieve vormen 225
 - complexiteit van 220, 221, 223, 224
 - hersenstructuur weerspiegeld in structuur van 223
 - kennisverscheidenheid als voorwaarde voor 222, 225

- 'opkomende' eigenschappen van 221
- en orde 36, 220, 222
- en regels 220-223
- structuur van 220, 221
- Tweede Theorema-vorm 220, 225
- machines
 - reproductie van 91, 92
 - structuur van 64
- Magus, The* (Fowles) 124
- Maistrov, Leonid 51
- Mamun, al- 111
- Manhattan Project 90, 92
- Marshack, Alexander 130, 131
- massaproductie 224
- Maxwell, James Clerk
 - invloed op Boltzmann 34
 - duiveltje van 43, 76, 230
- McCarley, Robert 164, 165, 199-201
- McIntyre, Michael 178, 179
- mechanica 25, 35, 57
 - versus moderne fysica 227
- medicijnen, homeopathische 52
- mens
 - asymmetrie 203
 - en chimpansees 117
 - DNA 105, 117, 118, 123
 - en evolutie 115, 116, 117, 121, 122, 224
 - foetale stadia 115, 116, 121
 - als individualistisch wezen 121
 - instinctieve mentale trekken 121
 - en neotenie 119-122
 - ontwikkelingspatroon van de 116, 119-121, 123
 - en sociale afhankelijkheid 121
 - en specialisatie 194
 - als weinig gespecialiseerd dier 121, 224
- de Méré, Chevalier 50
- Mises, Richard von 53, 54
- Monling, taal 223
- Moore, Edward 19
- Moore, G.W. 115
- morfologie 145
- morse, code 61
- Morse, Samuel 61
- motoren, theorieën omtrent 29, 31, 32, 164
- mutaties 81, 115, 116, 125, 127
- muziek 64
 - atonale systemen 154
 - grammatica van 153
 - hogere-orde variabelen 174
 - intervallen in tertsen en sexten 154
 - als kennisvorm 153
 - tonale systemen 154

- wonderkinderen 153
- mythen 155, 202

N

National Defense Research Committee 27

natuur

- beschrijvingen 219
- communicatie in de 59
- en complexiteit 217
- informatie in de 15, 16, 227,
- interne bewijzen 52
- en ordening 17
- en redundante codes 68, 69
- en signaturenleer 52
- statistische wetten in de 35
- testimonium van de 59
- uitgedrukt in vergelijkingen 34

natuurskunde 16

- Aristoteles' definitie 227
- en entropieparadox 42, 43
- en entropieprincipe 17
- geestesconstructiesconstructies 143
- groepentheorie en 175
- en klassieke mechanica 227
- onderzoek naar niet-waarneembare eigenschappen 146
- en reversibiliteit 73, 74
- theoretische concepten 97
- tijdloosheid in 217
- universele wetten 217
- en waarschijnlijkheidstheorie 25

natuurlijke selectie, zie ook evolutie

- als anti-toevalsinstrument 98
- computermodel 115
- en cybernetica 21
- en eiwitten 80, 81
- genduplicatie in 127
- genetische obstakels 112
- synthetische theorie 84

Neanderthalers 128-130

- cultuur 133
- gereedschapsgebruik bij 129, 134
- hersenen van 128-130
- symboolgebruik bij 129, 130

Necker, kubus van 173

Nederlandse taal 60, 148

neotenie 118-122

- als basis voor beschaving 122
- definitie 119
- hersenvorming 120-122
- bij mensen 118, 121, 122
- spel als indicatie voor 122, 123
- voorbeelden 119-120

Neumann, John von 29, 50, 63, 64,

163, 164

- achtergrond van 90, 91
- over beschrijvingen van systemen 219
- over complexe systemen 90, 91, 94, 218, 219

neuronen

- activiteiten remmende 163, 166
- en boodschappen 161
- elektrochemische pulsen tussen 161
- informatieverwerking in 162
- synaptische kloof 162, 163
- in visuele perceptie 180
- vuren 162, 163, 180

Newman, James R. 47, 175

Newtons wetten

- van beweging 16, 232
- van beweging bij zware lichamen 33, 35
- en determinisme 25, 26
- van de mechanica 25, 35, 231
- en reversibiliteit 48
- en volmaakte informatie 44

nirwana-principe 165

Novial, taal 223

O

Occidental, taal 223

Ohno, Susumu 126-128

omgeving

- complexiteit van 114
- informatie in 180
- voor leergedrag 122, 123
- oorzaak en gevolg 217, 221
- in zintuiglijke waarneming 173

onbewogen beweging 232

onvolledigheidstheorema 94

oosters mystiek denken versus gibsoniaanse waarnemingspsychologie 173

opkomstconcepten 88, 89, 221

Oppenheimer, Robert 90

orde

- daling in de tijd 36
- in ongebonden systemen 77
- als onwaarschijnlijkheid 36
- waarde 36

organismen, structuur van 63, 64

ostracodermen 98, 99

ØX174 virus 105, 106

P

paleontologie 125, 126

Paracelsus 52

Pascal, Blaise 50, 51

pentadecathlon 93

perceptie, zie waarneming

performance-concept 137, 157, 195

perspectief 178, 179

Petersen, Aage 95

Pierce, J.R. 19

Pierce, John 46

Pinter, Harold 157

placentalia 114, 115

Plato 228

poëzie, interpretaties 96, 208

Poitras, Edward 27

poker 50

politieke theorie 220

pons 199, 200

Precambrium 126

Prigogine, Ilya 88, 89, 217

Principia Mathematica (Russell & Whitehead) 54

Principles of Geology (Lyell) 125

Process and Reality (Whitehead) 63

programmeringsspoekjes 168

Project for a Scientific Psychology (Freud) 164, 165

Project Zero 153

propaganda, politieke 167

proteïnen, zie eiwitten

psychologie

- esthetische en mystieke ervaringen 192, 193
- gibsoniaanse richting 173
- en linguïstiek 158
- transformatieprincipes 145
- en waarneming 172, 173

R

radar 23-25

radiosignalen 24

Raisbeck, Barbara & Gordon 20

Randall, John Herman 227, 228

rapid-eye-movements 200, 201

rationeel geloof 54

recursieve functies, theorie 143

redundantie 59-64

- als belemmering 59, 64
- en Black English 63
- in boodschappen 64, 171
- complexiteit mogelijk gemaakt door 64, 64, 91, 92, 218, 219
- context-gevoelige vorm 102-104, 185, 186
- context-onafhankelijke vorm 102, 103, 185, 186
- definitie 59
- in DNA 99, 102-106, 126, 127
- entropiedaling door 104

- in foutcorrigerende codes 67-69, 171
- in het geheugen 183, 186
- herhaling als 126
- in de hersenen 163
- niet-triviale gevolgen 61
- niveaus 68
- prijs van 102
- regels als 60, 64
- in de samenleving 222, 223
- Shannons experimenten 61, 62 184-186
- soorten 60, 61
- in taal 60, 61
- in visuele perceptie 181
- en voorspelbaarheid 185
- Réflexions sur la puissance motrice du feu sur les machines propres à développer cette puissance* (Carnot) 31, 39
- regels, primaire en secondaire 221
- renaissance, theorieën uit de 50, 52, 183, 184
- Rensberger, Boyce 148
- Rensch, Bernhard 114
- reptielen 114
- ribitoldehydrogenase 113
- ribonucleïnezuur 80
- RNA (ribonucleïnezuur) 80
- Ro, taal 223
- Romantiek 18
- Ronat, Mitsou 222, 223
- Rorschach-tests 169
- Rose, Steven 163
- ruimte 73
- ruimtevaart en codes 68
- ruis
 - in boodschappen 20, 26, 59, 66, 67, 135
 - definitie 24
 - hoge entropie als 30
 - meerduidigheid als 138
 - als waarschijnlijkheid 40
- Ruskin, John 171
- Russell, Bertrand 22, 24, 54

S

- salicylaten 52
- Sanger, Frederick 105, 106
- Sapir, Edward 87
- Saturnus 34, 68
- Sayers, Dorothy L. 45, 46
- Schiller, Friedrich von 33
- schizofrenen 214
- Schönberg, Arnold 154
- Schopenhauer, Arthur 33

- Schramm, Wilbur 167
- Scientific American* 93
- Shakespeare, William 100
- Shannon, Claude
 - achtergrond 19, 20
 - artikelen van 16, 17, 97
 - bit gemaakt tot eenheid door 65
 - Chomsky's affiniteit met 135, 143
 - over computers 161, 169
 - entropievergelijking 17, 18, 184, 217
 - over fouten 171
 - foutcorrigerende code van 171
 - ideale code 68, 69
 - over 'ideale decoderder' 181
 - informatietheorie 87, 97, 214, 215
 - informatiewetten volgens 16
 - nuttige inhoud bepaald door 136
 - ongepubliceerd werk 19
 - over ontwikkelingen in informatietheorie 64
 - onzekerheid versus entropie in werk van 29
 - oorlogswerk van 59, 66, 67
 - over redundantie in de hersenen 163
 - redundantieonderzoek 61, 62, 185, 186, 211
 - Tweede Theorema van 67-69, 97, 98, 103, 104, 217, 218
 - over verband tussen informatie en thermodynamica 46
 - Weavers visie op 135
 - Wieners visie op 20, 21
- Shaw, Robert 178-180
- signaturenleer 52
- Simon, John 63
- Simonides 183
- slaap, functies van 199, 201, 202
- Smith, Neil 149
- socialisme, variatie en 225
- specialisatie 119, 120, 122, 224
- spel 122, 123
 - in de evolutie 124
 - versus letterlijkheid 123
 - en regels 122, 123
 - spontane innovatie in 123
 - als symptoom voor evolutionaire wendbaarheid 122
 - theorieën 122, 123
- spelling, redundantie in 60, 61
- Spengler, Oswald 45
- spraak
 - als zijnde chaotisch 140, 141
 - beeldspraken 213
 - en codes 207

- context in 211
- fonetische segmenten overlappend in 207
- ingewikkeldheid van 207
- linkerhemisfeer als oorsprong van 203-207
- onbewuste verwachtingen en 193
- ontwikkeling van 140
- als performance 140

statistiek

- en determinisme 44
- en informatietheorie 24, 25, 52, 53

Stern, Isaac 64

stochastische series 25

stoommachines 31, 164

structuralisten 136

supercomputers 48

symbolen 79

- bij Cro-Magnonmens 130-132
- in dromen 198
- bij Neanderthalers 130, 134
- niet-eenvoudige verbindingen met materie 81

- oorsprong van 128, 129

- en overleven 132
- in paleolithische kunst 132

synaps 162, 163

- als codeerstations 162, 163
- neuronen gescheiden door 162
- ontstaan van onzekerheid in 163
- passerende pakketten chemicaliën 163

Syntactic Structures (Chomsky) 110

syntaxis 145, 149, 150

- autonomieit 194
- in Chomskys theorie 136, 137, 157, 158
- grammaticale reeksen gegenereerd door 156
- als linkerhemisfeerfunctie 208, 209, 212-214
- en geheugen 183, 188, 190, 191, 194, 195, 214
- taal als 156
- synthetische a priori uitspraak 141
- als zuiver kader 156

synthetische theorie 84

systemen

- geestesstructuur en 224
- oorzaak en gevolg in 218
- open versus complexe 90, 217-219
- in totaliteit 217

Szilard, Leo 43, 103

T

taal

- en competence 137, 140, 157
- complexiteit 87, 156
- en creativiteit 82, 141, 156, 212
- drift in 87
- en evolutie 89, 132
- figuurlijk gebruik 212, 213
- als geestespiegel 145
- en geestesstructuur 146, 223
- generatieve grammatica 82
- handhaven begrijpelijkheid 87, 112
- en hersenhelften 203-210
- keuzevrijheid in 62
- kunstmatige 223
- letterlijkheid en 210
- niet-fysieke aspecten 79
- nieuwe boodschappen 141
- performance 137, 157, 158
- redundantie in 60, 61
- regels, zie ook linguïstiek, regels
- regels versus genetische regels 79-85
- sociale doeleinden 156
- structuraafhankelijkheid 145, 187
- syntactisch adequate veranderingen
- taalonafhankelijke theorie 142
- universele grammatica 109, 140, 147, 148-152, 197, 222, 223
- verwerving 140, 147
- voorspelbaarheid 60
- waarschijnlijkheid 40, 41, 59, 60 112

taxis 220

technologie

- van informatie 225
- en spel 123

televisiezenders 164

Tempter, The (Wiener) 22

theologie kosmologische 231

theorie

- doel van 140, 141
- feiten gegenereerd door 197
- als onafhankelijk gegroeid 142, 143

thermodynamica, eerste wet 32

thermodynamica, tweede wet, zie ook entropie

- als antropomorfie 45
- dynamiek van beweging 34
- extreme toepassingen 100
- en informatietheorie 57
- Maxwells duiveltje 42, 43
- en onvolmaakte informatie 44
- postklassieke visie op 217
- en taal 87
- toepassingen in andere disciplines 45

- verband tussen orde en waarschijnlijkheid in 47
- vroeg werk 32-35
- en wet van de grote getallen 47-49
- en waarschijnlijkheid 40, 44, 47, 57
- en het zoeken naar zekerheid 48
- thermodynamische pijn 74, 75, 78, 104
- thermodynamische systemen
 - belemmeringen in 148
 - eigenschappen van 89
 - evenwicht in 88, 89, 101, 102, 217, 224, 225
 - fluctuaties in 88
 - fysische wetten als universalia in 217
- toehoorders, reacties van 167
- toeval bij Brownse beweging 24, 25
- Treatise on Probability*, A (Keynes) 54
- Tribus, Myron 55, 56
- Twain, Mark 184
- tijgersalamander 120
- tijdpijn 83-84

U

- Ulam, Stanislaus 92, 94
- universum 73-75
 - complexer worden van 73-76, 78
 - kosmisch symmetriepincipe 76
 - ontstaan van 73, 74
 - onverwachte eigenschappen 77
 - uitdijing 74, 75, 78

V

- Vallou, Annette 96
- Verbrugge, Robert 195, 212, 213
- vergelijkingen
 - Boltzmanns visie op 34
 - voor entropie 18, 41, 42, 184, 217
- verscheidenheid, concept 40, 41
- verscheidenheidstheorie 225
- versmelting in het geheugen 192, 193
- vertebraten 104, 115, 124, 127
 - DNA van 103
 - en evolutie 98, 99
 - hersenen van 218, 219
- virussen 93, 94, 105, 106
- visuele perceptie, zie waarneming
- vitalisme 119
- vorm, realiteit en 228-230
- Voyager II 68

W

- waarneming, visuele 166, 167, 171-175, 178-181
 - en anti-toevalsinstrumenten 181
 - en creativiteit 180, 181
 - en cybernetische terugkoppeling 180
- ecologisch model voor 178
- esthetische voorkeur in 180
- in de evolutie 180
- Gibsons theorie 173-175
- en groepengenerator-principes 177-179, 181
- hogere-ordevariabelen in 174
- en invarianten 175, 184
- lichtstructuur en 173-175
- als niet-uniform 181
- 'onbevangen oog' 171, 172, 179-181
- onzekerheid en 171
- oogbewegingen 180, 200
- als persoonlijke daad 180
- perspectief in 178, 179
- redundantie en 181
- en testen van hypothesen 172, 173
- waarschijnlijkheid
 - en geloofwaardigheid 54
 - objectivistische visie op 53, 56
 - partiële kennis gecodeerd in 54
 - relatieve frequentie-interpretatie 53, 56
 - subjectieve-objectieve eigenschappen 51, 52, 53
 - subjectivistische interpretatie 54, 56
 - in taal 40, 41, 59-61
 - en thermodynamica 40, 44, 57
- waarschijnlijkheidstheorie
 - Cardano's werk 49, 50
 - en entropie 29, 34, 35, 40, 41, 44
 - en ervaring 53
 - als filosofisch zwak 47
 - gecodeerd in bits 65, 66
 - in de informatietheorie 54-56, 59, 60
 - informatietheorie als stimulus tot 15
 - en infrequente gebeurtenissen 54
 - interne bewijzen voorafgaand aan 52, 53
 - versus intuïtie 50, 51
 - en jainaanse logica 51
 - en kansspelen 50, 60
 - klassieke vorm 53
 - en niet-evenwicht 89
 - oorsprong van 49, 50

- en statistiek 24, 25, 53
- vertraagde ontwikkeling van 50-53
- waarschijnlijkheidsrelaties 54
- en wet van de grote getallen 47-50

warmte

- arbeid en 31, 36
- Carnot en 31, 32
- en entropie 32, 33
- omzetting van energie 35
- stromingstheorie 31
- als wanordelijke energie 35, 36

Watanabe, Michael 110

waterrad 30

Watson, James 18

Weaver, Warren 135

Wereldoorlog, Eerste 22

Wereldoorlog, Tweede 23, 26-28, 59, 66

werktuiggebruik 122, 123, 129, 132, 134

wetenschappen

- exacte 96

- 'lagere' 52

wetten en regels 221

Weyl, Hermann 19

Wheeler, John 89

Whitehead, Alfred North 54, 62, 63

Wiener, Leo 21, 22

Wiener, Norbert

- achtergrond 20-23
- en cybernetica 21
- over mechanische techniek versus communicatietechniek 164
- oorlogswerk van 23, 24, 27, 28
- over Shannons artikelen 20
- als wiskundige 22, 23
- over zekerheid 24-26

Wilson, Allan 117

Wilson, Buford 178-180

Wilson, Deirdre 149

Winterowd, W. Ross 214

wiskunde

- Chomsky's theorie en 143
 - Gödels Onvolledigheidstheorema 94, 95
 - groepentheorie 175, 176
 - Hardy's werk 22
 - en informatietheorie 15
 - woordbetekenis, functie van rechterhemisfeer 208
- Wordsworth, William 96

Y

Yates, Frances 183

Yin, Robert K. 204

Z

Zaidel, Eran 213

zelfconcept 198

zelfreparerende codes 67

zelfreproductieproces 92

zinnen

- betekenis 137
- context 211
- dieptestructuur 138, 139, 143, 186, 187
- gegenereerd door regels 127
- en geheugen 186, 187
- geïnternaliseerde regels 82
- en grammatica 139, 140
- meerduidigheid opgelost in 138
- oppervlaktestructuur 138, 139, 143, 186, 187
- sporen in 139
- stochastische sequenties in 25
- structuur als beschrijving van 137, 138
- transformatieregels 138-140, 151, 152
- verbanden tussen delen 137
- zonne-energie 30, 74, 75
- zoogdieren 113-116, 124
- Zuckerhandl, Emile 117

X

xylitol 113

JEREMY CAMPBELL

HOMO GRAMMATICUS

DE INFORMATIETHEORIE ALS DE
GRAMMATICA VAN DE NATUUR

Wat is dat voor een boek waarvan Martin Gardner schrijft: 'Het omslaan van de bladzijden is als het omdraaien van een sleutel in een rijtje gesloten deuren: je hebt geen idee welke nieuwe inzichten je achter de volgende zullen overvallen'.

Homo grammaticus gaat over 'denken' als proces van informatie overdracht en verwerking. Een van de recentste ontdekkingen is dat 'denken' niet alleen het domein van de mens is. De natuur 'denkt' ook, als we bijvoorbeeld het proces van coderen en decoderen in de genenuitwisseling zo mogen noemen. En in ons eigen brein zijn het neuronen die als boodschappers tussen de zenuwcellen fungeren, net zo als een elektronenpuls een bit in een computer transporteert.

Een van de grootste problemen in de menselijke en natuurlijke communicatie is het scheiden van boodschap en 'ruis', die even onvermijdelijk is als storing in een telefoonverbinding. De hier bedoelde ruis is echter geen technisch, maar een fundamenteel probleem: het is de onduidelijkheid die inherent is aan de verbale communicatie en de entropische verwarring die in natuurlijke communicatiesystemen optreedt.

De sleutel wordt geleverd door de informatietheorie, die als een grammatica orde schept in ongezuiverde informatiestromen. Militaire coderingsvraagstukken in WO II stimuleerden de Amerikaanse wiskundige Shannon tot het definiëren van het begrip informatie en het afleiden van wetten uit de statistiek en de waarschijnlijkheidsleer. Dat zijn theorie behalve voor de natuurwetenschappen ook van groot belang zou blijken voor de ontwikkeling van de informatica en de kunstmatige intelligentie, kon hij toen nog niet vermoeden.

***'Een intellectueel avontuur van
de bovenste plank'***

Martin Gardner